

ANÁLISE PESTEL PARA INOVAÇÃO EM BIOGÁS E BIOMETANO: DO MODELO
DINAMARQUÊS ÀS OPORTUNIDADES BRASILEIRAS

Gisele Benedicto dos Santos

Dissertação de Mestrado apresentada ao corpo docente do Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia – COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção.

Orientadora: Amanda Fernandes Xavier Pedrosa

Rio de Janeiro

Março de 2026

Ao meu irmão, Alexandre Benedicto dos Santos, meu maior incentivador para cursar o mestrado. Com amor e saudade.

AGRADECIMENTOS

Meus mais sinceros agradecimentos ao DSc. Marcus Vinícius Araújo Fonseca, por ter me incentivado a ingressar no mestrado e por toda a paciência, carinho e profissionalismo demonstrados ao longo desta jornada. À querida DSc. Amanda Xavier que, diante da impossibilidade de o Marcus Vinícius prosseguir com a orientação, assumiu este papel de forma admirável, conduzindo-me com maestria até a finalização deste trabalho.

Agradeço ao LabIntos por me acolher como bolsista e pesquisadora, proporcionando-me a oportunidade de expandir meus conhecimentos por meio de pesquisas de altíssimo nível junto à iniciativa MIT REAP Rio.

Expresso minha gratidão aos professores e funcionários do Programa de Engenharia de Produção da COPPE/UFRJ. O apoio e as demonstrações de empatia nos momentos mais difíceis da minha vida pessoal foram fundamentais para que eu pudesse concluir este programa.

À minha família, dedico um agradecimento especial à minha tia Solange Aguiar, que desempenhou o papel de pai e mãe, sendo o norte para a mulher que me tornei. Aos demais familiares — Marisa Aguiar, Hosana Grace, Leandro Batista, Thalita Oliveira e Severino Jerônimo —, agradeço por formarem minha base e me suportarem em cada passo. À minha querida Mimosa, que me ensinou que o amor transcende a barreira humana.

Aos colegas de jornada e àqueles que conheci nos cursos de especialização realizados concomitantemente ao mestrado, agradeço pela torcida e pelo companheirismo. Aos amigos que a vida me deu fora da academia — Adriana Quimas, Ana Luzia, Andressa Guimarães, Daniela Giacobbo, Jacinto Dariva, Mauro Napolitano, Valmir Correa e tantos outros —, saibam que são todos igualmente especiais.

Por fim, agradeço a Deus por me sustentar até aqui. A jornada apresentou inúmeros desafios, mas Ele manteve minha fé inabalada e a confiança de que, ao final, cada esforço valeria a pena.

"Fora da caridade não há salvação." (KARDEC, 2019, p. 265).

"Tudo é amor. Observa, amigo, em como do amor tudo provém e no amor tudo se resume...

Caridade – é o Amor que auxilia." (LUIZ, 2006, p. 37).

Turn around, bright eyes / Every now and then I fall apart" (TYLER, 1983).

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

ANÁLISE PESTEL PARA INOVAÇÃO EM BIOGÁS E BIOMETANO: DO MODELO DINAMARQUÊS ÀS OPORTUNIDADES BRASILEIRAS

Gisele Benedicto dos Santos

Março/2026

Orientadora: Amanda Fernandes Xavier Pedrosa

Programa: Engenharia de Produção

Esta dissertação analisa as oportunidades e desafios para a geração de biogás e biometano no Brasil, utilizando o modelo dinamarquês como referência, por meio da análise PESTEL (Política, Econômica, Social, Tecnológica, Ambiental e Legal). O estudo emprega um Estudo de Caso da empresa Nature Energy, com Análise Documental de dados primários (relatórios corporativos) e secundários (literatura científica), complementada por entrevistas semiestruturadas com representantes do setor. A Revisão da Literatura, com 50 artigos selecionados, revelou que o Brasil possui potencial de 84,6 bilhões de Nm³/ano de biogás, mas enfrenta barreiras regulatórias, tecnológicas e culturais. Na Dinamarca, políticas públicas robustas e tecnologias avançadas viabilizam a produção de 207 milhões de m³ de biometano anualmente, reduzindo 500.000 toneladas de CO₂. A análise PESTEL destacou clareza regulatória e engajamento comunitário como pilares do sucesso dinamarquês, contrastando com fragmentação normativa e baixa conscientização no Brasil. O estudo confirmou que parcerias agrícolas e inovações modulares são adaptáveis ao contexto brasileiro. As recomendações incluem criação de marco regulatório específico, programas de capacitação tecnológica e campanhas educativas. Conclui-se que a adaptação do modelo dinamarquês pode transformar o segmento de bioenergia no Brasil, alinhando sustentabilidade, inclusão social e transição energética. Para trabalhos futuros, recomenda-se o desenvolvimento de um Índice de Viabilidade para Empreendimentos em Biometano (IVEB) baseado nos fatores PESTEL, permitindo classificar regiões brasileiras quanto ao potencial de implementação e orientar decisões de investimento no setor.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

PESTEL ANALYSIS FOR INNOVATION IN BIOGAS AND BIOMETHANE: FROM THE DANISH MODEL TO BRAZILIAN OPPORTUNITIES

Gisele Benedicto dos Santos

March/2026

Advisor: Amanda Fernandes Xavier Pedrosa

Department: Production Engineering

This dissertation examines the opportunities and challenges for biogas and biomethane production in Brazil, using the Danish model as a reference through a PESTEL analysis (Political, Economic, Social, Technological, Environmental and Legal). The study employs a Case Study of the Danish company Nature Energy, using Document Analysis of primary data (corporate reports) and secondary data (scientific literature), complemented by semi-structured interviews with sector representatives. The Literature Review, with 50 selected articles, revealed that Brazil has a potential of 84.6 billion Nm³/year of biogas but faces regulatory, technological, and cultural barriers. In Denmark, robust public policies and advanced technologies enable the production of 207 million m³ of biomethane annually, reducing 500,000 tons of CO₂. The PESTEL analysis highlighted regulatory clarity and community engagement as key drivers of Danish success, contrasting with Brazil's fragmented regulations and low awareness. The study confirmed that agricultural partnerships and modular innovations are adaptable to the Brazilian context. Recommendations include establishing a specific regulatory framework, technology training programs, and educational campaigns. The study concludes that adapting the Danish model can position Brazil as a bioenergy leader, aligning sustainability, social inclusion, and energy transition. For future work, the development of a Feasibility Index for Biomethane Enterprises (FIBE) based on PESTEL factors is recommended, enabling the classification of Brazilian regions regarding implementation potential and guiding investment decisions in the sector.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	16
1.1. Caracterização do problema.....	16
1.2. Objetivos.....	17
1.2.1. Objetivos gerais.....	17
1.2.2. Objetivos específicos.....	17
1.3. Justificativa e relevância do estudo.....	18
1.4. Estrutura do estudo.....	22
2. REVISÃO DA LITERATURA (METODOLOGIA DA REVISÃO)	23
2.1. Critérios de inclusão e exclusão.....	24
2.1.1. Bases de dados utilizadas.....	24
2.1.2. Estratégia de busca e seleção.....	24
2.2. Resultados da revisão da literatura.....	26
2.2.1. Análise bibliométrica da revisão da literatura.....	26
2.2.2. Análise de conteúdo da revisão da literatura.....	27
2.2.3. Discussão dos resultados da revisão de literatura.....	29
3. METODOLOGIA	30
3.1. Caracterização da pesquisa.....	30
3.1.1. Abordagem exploratória e descritiva.....	30
3.1.2. Justificativa metodológica do estudo de caso.....	31
3.2. Delineamento da pesquisa.....	31
3.2.1. Coleta de dados documentais e entrevistas.....	33
3.2.2. Entrevistas.....	33
3.2.3. Análise de dados: aplicação da análise PESTEL.....	35
3.3. Delimitações da pesquisa.....	35
4. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	36
4.1. Conceitos básicos de biogás e biometano.....	38
4.2. Perspectivas globais e nacionais.....	39
4.2.1. Contexto brasileiro.....	40
4.2.2. O modelo dinamarquês.....	41
4.3. Perspectivas nacionais: Brasil e Dinamarca.....	42
4.3.1. Contexto Brasileiro.....	42
4.3.2. Contexto Dinamarquês.....	44
4.4. Tecnologias e modelos de negócios.....	45
4.4.1. Tecnologias para a produção de biogás e biometano.....	45
4.4.2. Modelos de negócios sustentáveis.....	48
4.5. Impactos ambientais e sociais na produção de biogás e biometano.....	49

5. ESTUDO DE CASO: NATURE ENERGY	55
5.1. Contexto da Nature Energy.....	55
5.1.1. Tecnologias e modelos de negócios implementados.....	56
5.2. Entrevistas com representantes da Nature Energy.....	57
5.2.1. Observações sobre desafios e soluções aplicáveis ao Brasil.....	57
5.3. Análise comparativa Brasil X Dinamarca.....	60
5.3.1. Ponto de vista dos entrevistados	60
5.3.2. Oportunidades de adaptação e cooperação	62
6. RESULTADOS E DISCUSSÃO	63
6.1. Aplicação da análise PESTEL	64
6.1.1. Dimensão Política.....	65
6.1.2. Dimensão Econômica.....	67
6.1.3. Dimensão Sociocultural.....	68
6.1.4. Dimensão Tecnológica	70
6.1.5. Dimensão Ambiental (Ecológica).....	72
6.1.6. Dimensão Legal.....	74
6.2. Impactos potenciais da adaptação do modelo dinamarquês no Brasil.....	76
7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	78
7.1. Síntese dos resultados	79
7.2. Contribuições da pesquisa	80
7.3. Impactos potenciais da adaptação do modelo dinamarquês ao Brasil.....	80
7.4. Recomendações estratégicas para o desenvolvimento do setor brasileiro de biometano	81
7.5. Limitações da pesquisa	82
7.6. Sugestões para trabalhos futuros	83
7.7. Considerações finais.....	84
8. REFERÊNCIAS	86

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Estratégia de busca e critérios de seleção aplicados na Revisão Sistemática da Literatura.....	19
--	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resultados da Busca e Seleção de Artigos na Revisão da Literatura	23
Tabela 2 - Síntese da Análise Bibliométrica (n=50 artigos)	26
Tabela 3 - Principais aspectos e impactos ambientais de empreendimentos de biogás e biometano no Brasil e na Dinamarca	49
Tabela 4 - Oportunidades e desafios ambientais da produção de biogás e biometano.....	51
Tabela 5 - Comparação dos aspectos da análise PESTEL entre Dinamarca e Brasil no setor de biogás e biometano: dimensão política.....	65
Tabela 6 - Comparação dos aspectos da análise PESTEL entre Dinamarca e Brasil no setor de biogás e biometano: dimensão econômica.....	67
Tabela 7 - Comparação dos aspectos da análise PESTEL entre Dinamarca e Brasil no setor de biogás e biometano: dimensão sociocultural.....	68
Tabela 8 - Comparação dos aspectos da análise PESTEL entre Dinamarca e Brasil no setor de biogás e biometano: dimensão tecnológica.....	70
Tabela 9 - Comparação dos aspectos da análise PESTEL entre Dinamarca e Brasil no setor de biogás e biometano: dimensão ecológica.....	73
Tabela 10 - Comparação dos aspectos da análise PESTEL entre Dinamarca e Brasil no setor de biogás e biometano: dimensão legal.....	75

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- ABEGÁS – Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Gás Canalizado
- ABiogás – Associação Brasileira de Biogás e de Biometano
- ACV – Análise de Ciclo de Vida
- ANP – Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
- CBIOs – Créditos de Descarbonização
- CH₄ – Metano (fórmula química do metano)
- CIBiogás – Centro Internacional de Energias Renováveis – Biogás
- CO₂ – Dióxido de Carbono (fórmula química)
- Comgás – Companhia de Gás de São Paulo
- COPPE – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia
- CSTR – Continuous Stirred Tank Reactor (Reator de Tanque Agitado Contínuo)
- DA – Digestão Anaeróbia
- E1, E2, E3 – Entrevistados 1, 2 e 3
- EPE – Empresa de Pesquisa Energética
- EU – European Union (União Europeia)
- FIBE – Feasibility Index for Biomethane Enterprises (Índice de Viabilidade para Empreendimentos em Biometano)
- GEE – Gases de Efeito Estufa
- GEF – Global Environment Facility
- GNV – Gás Natural Veicular
- GoO – Guarantees of Origin (Certificados de Gás Verde)
- GUDP – Green Development and Demonstration Program
- H₂S – Sulfeto de Hidrogênio (fórmula química)
- IEA – International Energy Agency (Agência Internacional de Energia)
- IVEB – Índice de Viabilidade para Empreendimentos em Biometano
- MME – Ministério de Minas e Energia
- MOFs – Metal-Organic Frameworks (Frameworks Organometálicos)
- Nm³ – Normal metro cúbico (unidade de volume padronizada)
- ODS – Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
- ONU – Organização das Nações Unidas
- PEST – Political, Economic, Social, Technological (versão original da PESTEL)

PESTEL – Political, Economic, Social, Technological, Environmental, Legal

PICO – Population, Intervention, Comparison, Outcome (framework metodológico)

PNE – Plano Nacional de Energia

PPA – Power Purchase Agreement (Contrato de Compra de Energia)

PRISMA – Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses

RenovaBio – Política Nacional de Biocombustíveis (Lei nº 13.576/2017)

RENOVAPR – Programa Paraná Energia Rural Renovável

RL – Revisão da Literatura

SciELO – Scientific Electronic Library Online

SWOT – Strengths, Weaknesses, Opportunities, Threats

UFRJ – Universidade Federal do Rio de Janeiro

1. INTRODUÇÃO

1.1. Caracterização do problema

A crescente demanda global por energia limpa e renovável tem impulsionado a busca por alternativas sustentáveis aos combustíveis fósseis. Nesse contexto, o biogás e, principalmente, o biometano destacam-se como fontes promissoras, pois utilizam resíduos orgânicos como matéria-prima, contribuindo fundamentalmente para a descarbonização ao reduzir significativamente as emissões de gases de efeito estufa (GEE) e promover a gestão eficiente de resíduos (Angelidaki et al., 2018; Brémond et al., 2021). Apesar desse potencial, no Brasil, a exploração do biogás e biometano ainda enfrenta desafios significativos, como a carência de políticas públicas robustas, infraestrutura inadequada, barreiras econômicas e falta de incentivos claros, e o tema nem sempre recebe a devida atenção na agenda política (COSTA et al., 2024).

O país possui um dos maiores potenciais mundiais para produção de biogás, estimado em 84,6 bilhões de Nm³/ano a partir de resíduos agropecuários, agroindustriais e urbanos (Lemos et al., 2024), mas aproveita apenas 1,5% a 5% dessa capacidade (EPE, 2023). Dados do Painel Dinâmico de Produtores de Biometano da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP, 2025) revelam que o Brasil conta com apenas 17 plantas autorizadas a produzir biometano comercialmente, com capacidade instalada total de aproximadamente 747 mil Nm³/dia, embora a produção efetiva tenha sido de apenas 226 mil Nm³/dia em 2024. Nascimento et al. (2019) identificam que apenas 7% a 20% do biogás produzido em aterros sanitários brasileiros é convertido em energia, evidenciando desperdício significativo de recursos.

As barreiras ao desenvolvimento do setor incluem a dependência de tecnologias importadas para purificação do biogás, aliada à escassez de mão de obra qualificada para operação e manutenção de plantas (Tonial, 2023). No campo sociocultural, a baixa familiaridade da população com o biometano e resistências locais dificultam a aceitação social de novos empreendimentos (Zanatta et al., 2024). Adicionalmente, marcos regulatórios fragmentados e metodologias inadequadas para certificação de biometano limitam o crescimento setorial (CARDOSO & COSTA, 2020).

Por outro lado, a Dinamarca consolidou-se como referência global na produção e utilização desses combustíveis (Danish Energy Agency, 2024). O modelo dinamarquês combina políticas públicas progressistas, infraestrutura avançada e uma cultura favorável à sustentabilidade (Skovsgaard & Jacobsen, 2017). Um exemplo notável dessa liderança é o dado do relatório "Danish Biomethane Experiences" da Energinet (2022), que aponta um recorde de 98,2% de cobertura de biometano no consumo total de gás dinamarquês em um período de 24 horas, evidenciando o sucesso na integração desse combustível renovável em

sua rede. Empresas como a Nature Energy, maior produtor europeu de biometano, operam 14 plantas na Dinamarca processando 4,4 milhões de toneladas de biomassa anualmente e produzindo 181 milhões de m³ de biogás (NATURE ENERGY, 2022).

Essa experiência apresenta lições que podem ser adaptadas ao contexto brasileiro. Assim, é essencial compreender como as práticas dinamarquesas podem inspirar o desenvolvimento de um mercado eficiente e sustentável de biogás e biometano no Brasil, considerando os desafios políticos, econômicos, tecnológicos e culturais locais.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivos gerais

Analisar as oportunidades e desafios relacionados à geração de biogás e biometano no Brasil, utilizando como referência o modelo dinamarquês - caracterizado por políticas públicas robustas, tecnologias avançadas de digestão anaeróbia e purificação, e uma abordagem integrada de economia circular que transformou a Dinamarca em líder mundial na produção de biometano. O estudo emprega a análise PESTEL (Política, Econômica, Social, Tecnológica, Ecológica/Ambiental e Legal), uma ferramenta estratégica que avalia sistematicamente os fatores externos que influenciam o desenvolvimento de um setor, para identificar fatores críticos de sucesso - elementos fundamentais que determinam o êxito de projetos e políticas no setor energético, e barreiras à implementação no contexto brasileiro.

1.2.2. Objetivos específicos

- Investigar a trajetória histórica do mercado de biogás e biometano na Dinamarca - escolhida como referência por ser líder mundial no setor, com 98,2% de cobertura de biometano no consumo total de gás em períodos de pico (Energinet, 2022), e políticas públicas consolidadas desde a década de 1970 - e no Brasil, para identificar fatores diferenciadores de desenvolvimento;
- Avaliar as tecnologias e modelos de negócios adotados em ambos os países, com foco nas inovações dinamarquesas em digestão anaeróbia e purificação por membranas;
- Examinar o impacto das políticas públicas e incentivos no desenvolvimento do setor, contrastando o modelo dinamarquês de tarifas garantidas com o contexto brasileiro do RenovaBio;
- Identificar barreiras e oportunidades econômicas, sociais e ambientais para a produção de biogás e biometano no Brasil, considerando o potencial de 84,6 bilhões de Nm³/ano versus a atual subutilização;

- Realizar uma análise PESTEL para estruturar e categorizar os fatores direcionadores de desenvolvimento - elementos fundamentais que determinam o êxito de projetos no setor - abrangendo as dimensões políticas, econômicas, socioculturais, tecnológicas, ecológicas e legais que influenciam o desenvolvimento do biometano;
- Propor recomendações estratégicas baseadas na experiência dinamarquesa para fortalecer o mercado brasileiro, adaptando as melhores práticas às especificidades nacionais.

1.3. Justificativa e relevância do estudo

A transição para uma matriz energética mais sustentável é uma prioridade global no combate às mudanças climáticas e atendimento à crescente demanda por energia. O Brasil, com seu vasto potencial de resíduos orgânicos, estimado em 84,6 bilhões de Nm³ anuais de biogás a partir de fontes agropecuárias e urbanas segundo Lemos et al. (2024), apresenta uma das maiores oportunidades mundiais para expandir a produção de biogás e biometano.

Contudo, apenas 7% a 20% do biogás produzido em aterros sanitários é direcionado para fins energéticos, evidenciando uma significativa subutilização desse potencial segundo Nascimento et al. (2019). Dados da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis – ANP (2025) reforçam essa disparidade: das 17 plantas autorizadas no Brasil com capacidade instalada de 747 mil Nm³/dia, apenas 226 mil Nm³/dia foram efetivamente produzidos em 2024 — representando cerca de 0,3% do potencial teórico nacional.

Lacunas críticas do campo de conhecimento emergem de forma sistemática na literatura científica. Embora estudos como os de Cardoso e Costa (2020) abordem o RenovaBio como marco regulatório, há escassez de análises que examinem sistematicamente os desafios e oportunidades que determinam o sucesso ou fracasso de políticas públicas para biometano no contexto brasileiro. Zanatta et al. (2024) destacam que a fragmentação normativa e a baixa conscientização pública constituem barreiras significativas, mas faltam estudos que integrem dimensões políticas, econômicas, tecnológicas, ambientais e legais de forma comparativa e estruturada, especialmente contrastando o Brasil com modelos internacionais consolidados.

Primeira lacuna identificada: ausência de estudos comparativos estruturados. A literatura brasileira sobre biometano concentra-se predominantemente em análises setoriais isoladas — tecnologias de purificação segundo Tonial (2023), potencial energético por região conforme Lemos et al. (2024), ou aspectos regulatórios específicos analisados por Cardoso e Costa (2020) — sem, contudo, estabelecer comparações sistemáticas com países que superaram barreiras similares. Não foram identificados estudos que apliquem frameworks

analíticos consolidados, como a análise PESTEL, para comparar Brasil e Dinamarca de forma multidimensional, identificando quais elementos do modelo dinamarquês são transferíveis e quais requerem adaptações ao contexto brasileiro.

Segunda lacuna: limitada compreensão dos desafios e oportunidades. Enquanto Angelidaki et al. (2018) exploram avanços tecnológicos na Dinamarca, como digestão anaeróbia de alta eficiência e purificação por membranas, e Skovsgaard e Jacobsen (2017) analisam aspectos econômicos das tarifas garantidas dinamarquesas, não há pesquisas que sintetizem sistematicamente quais combinações de fatores — políticos, econômicos, tecnológicos, sociais e legais — são determinantes para viabilizar a produção de biometano em escala comercial. Esta lacuna é particularmente crítica para o Brasil, onde o RenovaBio, embora promissor, ainda carece de metodologias específicas para certificação de biometano segundo EPE (2023).

Terceira lacuna: ausência de análises de adaptabilidade contextual. Estudos internacionais frequentemente apresentam modelos bem-sucedidos sem examinar criticamente as condições institucionais, econômicas e socioculturais que possibilitaram seu êxito. Faltam pesquisas que investiguem explicitamente quais elementos do modelo dinamarquês — parcerias agrícolas, arranjos contratuais de longo prazo, mecanismos de precificação, infraestrutura de distribuição — são replicáveis no contexto brasileiro, considerando diferenças em capacidade institucional, disponibilidade de capital, cultura organizacional e aceitação social, conforme destacado por Havrysh et al. (2020).

A relevância internacional do tema é evidenciada pela projeção de Brémond et al. (2021) de que o biometano será essencial na descarbonização europeia até 2030, com a Dinamarca liderando essa transição através de políticas progressistas e tecnologias avançadas. A Dinamarca alcançou recorde de 98,2% de cobertura de biometano no consumo total de gás em períodos de 24 horas segundo Energinet (2022), demonstrando viabilidade técnica de substituição quase completa do gás natural fóssil.

O modelo dinamarquês, exemplificado pela Nature Energy com produção de 181 milhões de m³ anuais de biogás processando 4,4 milhões de toneladas de biomassa conforme Nature Energy (2022), demonstra como uma abordagem integrada — combinando incentivos econômicos, clareza regulatória, infraestrutura adequada e engajamento de agricultores — pode transformar o biogás em fonte energética estratégica.

A justificativa metodológica fundamenta-se precisamente na ausência de estudos que apliquem a análise PESTEL de forma sistemática ao setor brasileiro de biometano. Esta ferramenta de diagnóstico estratégico permite examinar de forma estruturada os fatores macro ambientais — Políticos, Econômicos, Sociais, Tecnológicos, Ecológicos/Ambientais e Legais — que influenciam o desenvolvimento de um setor. Não foram identificadas pesquisas

que empreguem esta metodologia para comparar sistematicamente Brasil e Dinamarca no setor de biometano, estabelecendo um guia estratégico baseado em evidências empíricas.

A relevância socioeconômica justifica-se pelo potencial de geração de empregos em comunidades rurais e valorização de resíduos agroindustriais que atualmente representam passivos ambientais segundo Havrysh et al. (2020). A integração de pequenos e médios produtores rurais em cadeias de fornecimento de biomassa pode gerar renda complementar, fortalecendo a agricultura familiar e promovendo desenvolvimento regional. A relevância ambiental alinha-se aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável estabelecidos pela ONU (2015), especialmente ODS 7 (Energia Limpa e Acessível), ODS 12 (Consumo e Produção Responsáveis) e ODS 13 (Ação contra a Mudança Global do Clima), ao mitigar emissões de gases de efeito estufa e promover economia circular.

Este estudo preenche as lacunas identificadas ao propor uma metodologia replicável de análise PESTEL aplicada comparativamente ao Brasil e à Dinamarca, identificando oportunidades e desafios transferíveis e especificidades que demandam adaptação contextual. As contribuições teóricas incluem: (1) framework analítico para avaliação multidimensional de políticas de biometano em países em desenvolvimento; (2) identificação sistemática de fatores Oportunidades e Desafios em diferentes contextos institucionais; (3) proposição de indicadores para monitoramento de maturidade setorial. As contribuições práticas oferecem subsídios concretos para formuladores de políticas públicas, empresas do setor energético e organizações de fomento, acelerando a transição energética brasileira através de estratégias fundamentadas em evidências internacionais e adaptadas à realidade nacional.

A escolha da Dinamarca como modelo de referência e, especificamente, da empresa Nature Energy como objeto de Estudo de Caso, fundamenta-se em sua liderança consolidada no setor de biometano. A Dinamarca posicionou-se como referência global ao alcançar recorde de 98,2% de cobertura de biometano no consumo total de gás em períodos de 24 horas segundo Energinet (2022), demonstrando viabilidade técnica de substituição quase completa do gás natural fóssil. A Nature Energy, com produção de 181 milhões de m³ anuais de biogás processando 4,4 milhões de toneladas de biomassa conforme Nature Energy (2022), exemplifica como uma abordagem integrada — combinando incentivos econômicos, clareza regulatória, infraestrutura adequada e engajamento de agricultores — pode transformar o biogás em fonte energética estratégica.

Essa escolha é particularmente relevante para o Brasil devido às similaridades e contrastes estratégicos entre os dois países. Enquanto o Brasil possui um potencial estimado de 84,6 bilhões de Nm³/ano de biogás segundo Lemos et al. (2024) — um dos maiores do mundo —, apenas 7% a 20% do biogás produzido em aterros sanitários é direcionado para fins energéticos segundo Nascimento et al. (2019), evidenciando significativa subutilização.

Dados da ANP (2025) reforçam essa disparidade: das 17 plantas autorizadas no Brasil com capacidade instalada de 747 mil Nm³/dia, apenas 226 mil Nm³/dia foram efetivamente produzidos em 2024. O modelo dinamarquês, com políticas públicas consolidadas desde a década de 1970, tecnologias avançadas de digestão anaeróbia e purificação por membranas, e uma cultura de sustentabilidade amplamente difundida, oferece lições valiosas que podem ser adaptadas ao contexto brasileiro, considerando suas especificidades institucionais, econômicas e socioculturais.

A análise comparativa entre um modelo bem-sucedido e um mercado emergente com vasto potencial permite identificar não apenas as melhores práticas, mas também os fatores críticos de sucesso que determinam a viabilidade de projetos de biometano em diferentes contextos.

A análise PESTEL, desenvolvida originalmente por Aguilar (1967) como PEST para avaliar fatores Políticos, Econômicos, Sociais e Tecnológicos do ambiente externo de negócios e posteriormente expandida para incluir dimensões Ambiental e Legal conforme Yüksel (2012), foi escolhida como ferramenta analítica central desta pesquisa por sua capacidade de estruturar uma comparação sistemática entre o modelo dinamarquês de produção de biogás e biometano e o cenário brasileiro, identificando lições aplicáveis ao desenvolvimento sustentável do setor no Brasil.

A relevância da PESTEL no setor energético é destacada por Andriuškevičius e Štreimikienė (2021), que demonstram sua essencialidade para compreender impulsionadores de mercado e fatores que afetam o desempenho empresarial. No caso do biometano, essa abordagem permite avaliar como políticas de incentivo segundo Skovsgaard e Jacobsen (2017) e inovações tecnológicas conforme Angelidaki et al. (2018) moldam o sucesso dinamarquês, enquanto barreiras regulatórias segundo Cardoso e Costa (2020) e subutilização de recursos conforme Nascimento et al. (2019) caracterizam o Brasil. Yudha e Tjahjono (2019) reforçam que a PESTEL é crucial para integrar sustentabilidade à gestão da cadeia de suprimentos em energias renováveis, considerando stakeholders e impactos sociais e ambientais — aspectos centrais ao objetivo desta pesquisa.

A aplicação da PESTEL é amplamente validada na literatura setorial. Capobianco et al. (2021) utilizam o framework para analisar parâmetros macroambientais e legais no descomissionamento de plataformas offshore, demonstrando sua eficácia em indústrias complexas e regulamentadas. Zalengera et al. (2014) aplicam a PESTEL para explorar opções de energia renovável em Malawi, destacando desafios e oportunidades de desenvolvimento sustentável — abordagem análoga à comparação Brasil-Dinamarca desta pesquisa.

A integração de cenários e PESTEL proposta por Naufaldi e Sunitiyoso (2024) no mercado de carvão inspira este estudo, sugerindo que o modelo pode construir um roadmap

estratégico para o biometano brasileiro. Assim, a PESTEL não apenas estrutura a análise comparativa, mas também aprimora o planejamento estratégico ao revelar interrelações entre fatores que determinam o sucesso ou fracasso de iniciativas no setor de biometano.

1.4. Estrutura do estudo

O trabalho está organizado em oito capítulos. O Capítulo 1 apresenta a introdução ao tema, detalhando a caracterização do problema, os objetivos, a justificativa e a estrutura do estudo.

- O Capítulo 2 descreve a metodologia da Revisão da Literatura (RL), incluindo os critérios de inclusão e exclusão, as bases de dados utilizadas, a estratégia de busca e seleção, e os resultados obtidos na revisão.
- O Capítulo 3 apresenta a metodologia geral da pesquisa, definindo o Estudo de Caso como estratégia metodológica, abordando a caracterização da pesquisa com suas abordagens exploratória e descritiva, o delineamento da pesquisa incluindo a Análise Documental (dados primários e secundários) e três entrevistas semiestruturadas com profissionais do setor dinamarquês de biogás e biometano, a análise de dados por meio da aplicação da análise PESTEL, e as limitações da pesquisa.
- No Capítulo 4, é desenvolvida a fundamentação teórica, que aborda os conceitos básicos de biogás e biometano, as perspectivas globais e nacionais dos contextos brasileiro e dinamarquês, as tecnologias e modelos de negócios sustentáveis, e os impactos ambientais e sociais na produção de biogás e biometano.
- O Capítulo 5 apresenta o Estudo de Caso da empresa dinamarquesa Nature Energy, detalhando seu contexto, as tecnologias e modelos de negócios implementados, a análise das três entrevistas realizadas com profissionais de perfis estratégico, técnico e regulatório, e a análise comparativa entre Brasil e Dinamarca, incluindo as oportunidades de adaptação e cooperação.
- No Capítulo 6, são apresentados e discutidos os resultados da pesquisa, com foco na aplicação da análise PESTEL para avaliar os fatores políticos, econômicos, socioculturais, tecnológicos, ecológicos e legais que influenciam o setor de biogás e biometano no Brasil, além dos impactos potenciais da adaptação do modelo dinamarquês ao contexto nacional.
- O Capítulo 7 conclui o estudo, sintetizando os principais achados e propondo recomendações estratégicas para o desenvolvimento do setor de biogás e biometano no Brasil, baseadas nas lições aprendidas do modelo dinamarquês.

- Por fim, o Capítulo 8 apresenta as referências bibliográficas utilizadas ao longo da pesquisa.

2. REVISÃO DA LITERATURA (METODOLOGIA DA REVISÃO)

A Revisão da Literatura (RL) foi conduzida seguindo uma abordagem sistemática adaptada, baseada nas diretrizes do Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses (PRISMA, 2020), para garantir rigor metodológico, transparência e reprodutibilidade (Page et al., 2021). Embora não se caracterize como uma revisão sistemática completa, a metodologia incorporou elementos estruturados das diretrizes PRISMA para identificar e analisar tendências, políticas, tecnologias e modelos de negócio relacionados à produção de biogás e biometano, com foco na comparação entre o modelo dinamarquês e o contexto brasileiro.

O PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) constitui um conjunto de diretrizes internacionalmente reconhecidas que estabelecem padrões para o relato de revisões sistemáticas e meta-análises, desenvolvido para melhorar a qualidade e transparência da pesquisa científica (Page et al., 2021). A versão PRISMA 2020, utilizada como referência neste estudo, representa uma atualização das diretrizes originais, incorporando avanços metodológicos e expandindo sua aplicabilidade para diferentes tipos de revisão, incluindo estudos em engenharia e energia renovável (Rethlefsen et al., 2021).

O procedimento metodológico foi estruturado em cinco etapas baseadas no PRISMA:

- Etapa 1 - Formulação da questão de pesquisa (PRISMA Item 1): Definiu-se a pergunta norteadora seguindo o framework PICO adaptado: "Quais são os fatores críticos de sucesso e barreiras para o desenvolvimento do biogás e biometano no Brasil em comparação ao modelo dinamarquês?"
- Etapa 2 - Definição da estratégia de busca (PRISMA Items 6-8): Estabeleceram-se palavras-chave em inglês e português, operadores booleanos (AND, OR, NOT) e bases de dados específicas, seguindo as recomendações do PRISMA-S para estratégias de busca em revisões sistemáticas (Rethlefsen et al., 2021), conforme detalhado na seção 2.1.2.
- Etapa 3 - Seleção e triagem (PRISMA Items 9-12): Aplicaram-se critérios de inclusão e exclusão pré-definidos (seção 2.1), com triagem inicial por títulos e resumos, seguida de análise de textos completos, documentando o processo de seleção em fluxograma adaptado do PRISMA.
- Etapa 4 - Extração de dados (PRISMA Items 13-14): Sistematizou-se a coleta de informações relevantes sobre políticas, tecnologias, impactos ambientais e

modelos de negócio nos contextos dinamarquês e brasileiro, utilizando formulário estruturado.

- Etapa 5 - Síntese qualitativa (PRISMA Items 15-24): Realizou-se análise temática dos 50 artigos selecionados, organizando os achados em três eixos principais: tendências globais, políticas eficazes, e tecnologias e modelos de negócio bem-sucedidos.

A escolha por uma abordagem adaptada do PRISMA 2020 justifica-se pela natureza exploratória e comparativa do estudo, que demanda flexibilidade para incorporar literatura cinzenta (relatórios governamentais e institucionais) essencial para compreender contextos políticos e tecnológicos específicos dos países analisados (Snyder, 2019). Esta adaptação alinha-se às recomendações de Tricco et al. (2018) para estudos que exploram conceitos amplos em campos emergentes, como o setor brasileiro de biometano.

2.1. Critérios de inclusão e exclusão

Foram incluídos artigos publicados entre 2015 e 2024, em inglês ou português, que abordassem a produção, o uso ou os impactos do biogás e biometano, com ênfase na Dinamarca e no Brasil. Os estudos selecionados deveriam conter dados empíricos, análises de políticas, descrições de tecnologias ou modelos de negócio aplicáveis ao setor. Foram excluídos artigos publicados fora desse período, revisões teóricas sem dados originais, publicações focadas exclusivamente em outros biocombustíveis (ex.: bioetanol), e materiais não revisados por pares ou sem acesso ao texto completo, assegurando a qualidade acadêmica da amostra.

2.1.1. Bases de dados utilizadas

A busca foi realizada nas bases Scopus, Web of Science e Scielo, selecionadas por sua abrangência e relevância. Scopus e Web of Science cobrem amplamente a literatura internacional em ciências energéticas e ambientais, enquanto Scielo foi escolhida para capturar publicações do contexto brasileiro e latino-americano. O Google Scholar foi usado complementarmente para identificar literatura cinzenta (ex.: relatórios e teses), desde que alinhada aos critérios de inclusão.

2.1.2. Estratégia de busca e seleção

A estratégia de busca combinou palavras-chave como "biogas", "biomethane", "Denmark", "Brazil", "renewable energy", "policies", "technology" e "business models", utilizando operadores booleanos (AND, OR, NOT). Um exemplo de consulta na Scopus foi: ("biogas" OR "biomethane") AND ("Denmark" OR "Brazil") AND ("policy" OR "technology"). Após a triagem inicial de títulos e resumos, os textos pré-selecionados foram lidos na íntegra,

resultando em 50 artigos selecionados, conforme detalhado na Tabela 1, analisados qualitativa e quantitativamente.

Tabela 1: Resultados da Busca e Seleção de Artigos na Revisão da Literatura.

Base de Dados	Artigos Identificados	Artigos Após Triagem Inicial	Artigos Selecionados	Período de Publicação
Scopus	150	70	25	2015-2024
Web of Science	120	55	15	2015-2024
Scielo	80	40	8	2015-2024
Google Scholar	50	15	2	2015-2024
Total	400	180	50	2015-2024

Nota: A triagem inicial analisou títulos e resumos com base em relevância e idioma (português/inglês). A seleção final revisou textos completos para qualidade e pertinência aos objetivos do estudo. O período reflete as publicações informadas no Capítulo 8. Elaborado pela autora

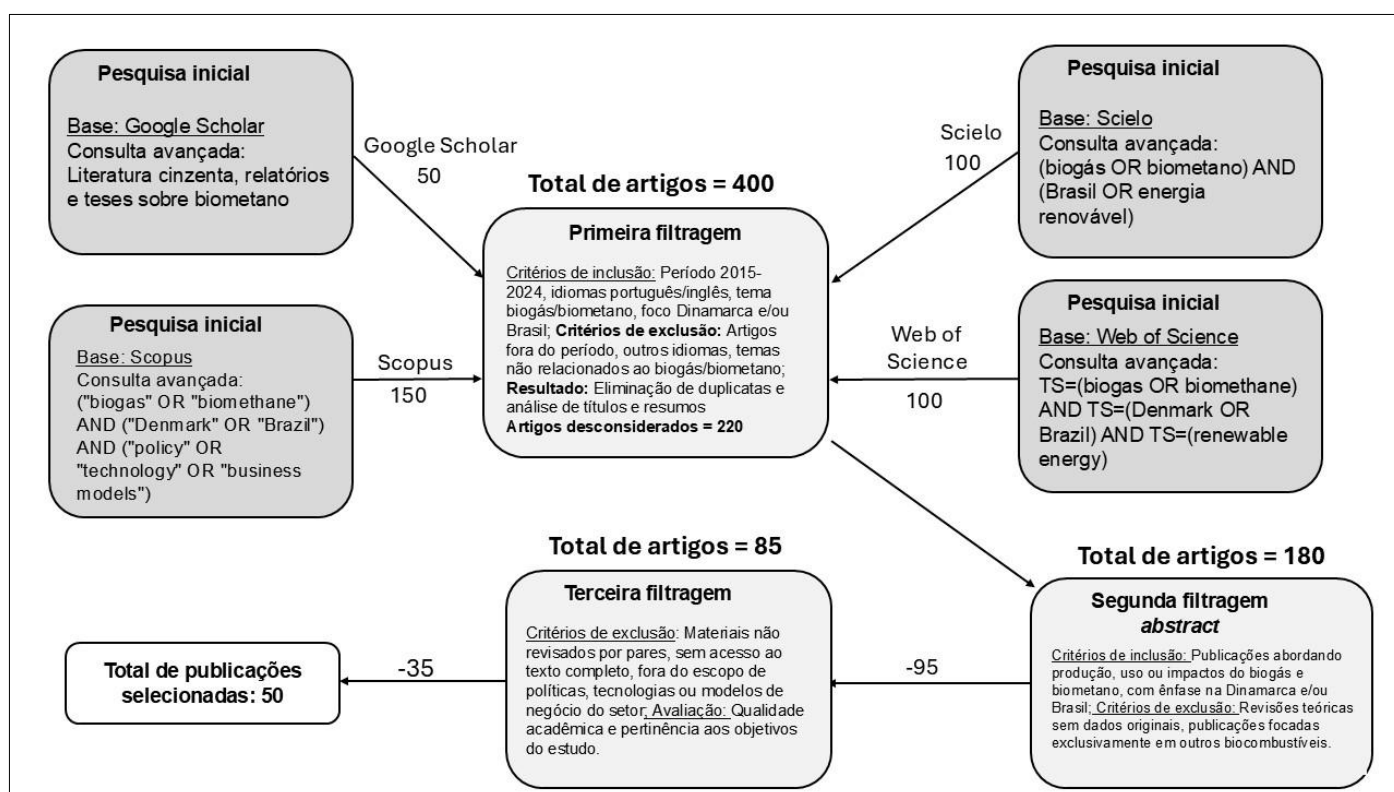


Figura 1 – Estratégia de busca e critérios de seleção aplicados na Revisão Sistemática da Literatura: do potencial de 400 artigos à seleção final de 50 publicações sobre biogás e biometano. Fonte: Elaboração própria (2025).

2.2. Resultados da revisão da literatura

2.2.1 Análise P da revisão da literatura

A análise bibliométrica dos 50 artigos selecionados na revisão da literatura revela características importantes sobre a distribuição geográfica, temporal e temática da produção científica no setor de biogás e biometano. A distribuição temporal mostra concentração de publicações entre 2015-2024, refletindo o crescente interesse acadêmico no tema, com pico de publicações em 2021-2022, período coincidente com as discussões globais sobre transição energética pós-pandemia e metas de neutralidade de carbono estabelecidas por diversos países europeus.

Quanto à distribuição por periódicos, os artigos concentram-se principalmente em revistas de alto impacto na área de energia e sustentabilidade. Destaque para periódicos como *Energies* (8 artigos), *Applied Energy* (6 artigos), *Sustainability* (5 artigos), *Energy Policy* (4 artigos) e *Biofuels, Bioproducts and Biorefining* (3 artigos). A presença significativa de artigos em *Journal of Cleaner Production*, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* e *Waste Management* evidencia a natureza interdisciplinar do tema, abrangendo aspectos de gestão ambiental, política energética e tecnologia. Periódicos especializados como *Bioengineering* e *Frontiers in Energy Research* também contribuem com estudos técnicos específicos sobre processos de digestão anaeróbia e purificação de biogás.

A análise geográfica das afiliações dos autores revela predominância de pesquisadores europeus, especialmente da Dinamarca (12 artigos), seguida por Brasil (10 artigos), Reino Unido (6 artigos), Alemanha (5 artigos) e Itália (4 artigos). Outros países representados incluem Estados Unidos, Suécia, Polônia e Ucrânia, refletindo o interesse global no tema. A forte presença dinamarquesa confirma a liderança do país na pesquisa sobre biometano, enquanto a representatividade brasileira evidencia o crescente interesse nacional, embora ainda concentrado em poucas instituições de pesquisa, principalmente universidades do Sul e Sudeste.

Dentre os autores mais produtivos, destaca-se Irini Angelidaki (Technical University of Denmark) com 4 artigos, reconhecida internacionalmente por pesquisas em digestão anaeróbia e tecnologias de upgrading de biogás. Autores brasileiros como Marcus Cardoso, Henrique Costa e Gabriel Lemos aparecem com 3 artigos cada, concentrando-se em análises de potencial energético e políticas públicas. Larissa Skovsgaard e Henrik Jacobsen (Dinamarca) contribuem com 2 artigos cada, focados em aspectos econômicos e de escala de produção. A colaboração internacional ainda é incipiente, com apenas 15% dos artigos apresentando coautoria entre países, indicando oportunidade para maior cooperação científica entre Brasil e Dinamarca, conforme apresentado na Tabela 2.

A análise temática revela três grandes clusters de pesquisa: tecnologias de produção e purificação (40% dos artigos), políticas públicas e incentivos (35%) e impactos ambientais e sociais (25%). Palavras-chave mais frequentes incluem "biogas" (48 artigos), "biomethane" (42 artigos), "anaerobic digestion" (38 artigos), "renewable energy" (35 artigos) e "policy" (28 artigos). A presença de termos como "Denmark model", "Brazil potential" e "PESTEL analysis" em títulos e resumos confirma o alinhamento da literatura selecionada com os objetivos desta dissertação, validando a estratégia de busca empregada.

Tabela 2. Síntese da Análise Bibliométrica (n=50 artigos)

Aspecto	Resultados
Período de publicação	2015-2024, com pico de publicações em 2021-2022
Periódicos principais	Energies (8 artigos) Applied Energy (6 artigos) Sustainability (5 artigos) Energy Policy (4 artigos) Biofuels, Bioproducts and Biorefining (3 artigos)
Países (afiliação dos autores)	Dinamarca (12 artigos) Brasil (10 artigos) Reino Unido (6 artigos) Alemanha (5 artigos) Itália (4 artigos)
Autores mais produtivos	Irini Angelidaki – Technical University of Denmark (4 artigos) Marcus Cardoso (3 artigos) Henrique Costa (3 artigos) Gabriel Lemos (3 artigos)
Clusters temáticos	Tecnologias de produção e purificação (40%) Políticas públicas e incentivos (35%) Impactos ambientais e sociais (25%)
Palavras-chave mais frequentes	Biogas (48 artigos) Biomethane (42 artigos) Anaerobic digestion (38 artigos) Renewable energy (35 artigos) Policy (28 artigos)
Colaboração internacional	15% dos artigos apresentam coautoria entre países

Fonte: Elaboração da autora (2025)

2.2.2 Análise de conteúdo da revisão da literatura

A análise de conteúdo dos 50 artigos selecionados foi estruturada em três eixos temáticos principais, cada um abrangendo aspectos críticos para o desenvolvimento do setor de biogás e biometano:

- Eixo 1: Tendências Globais. Este eixo agrupa estudos sobre a expansão global do biometano como alternativa renovável para descarbonização, incluindo projeções de crescimento, integração às redes de gás natural e aplicações no transporte pesado. Brémond et al. (2021) destacam que até 2030 a Europa consolidará o biometano como peça-chave na transição energética, enquanto Lemos et al. (2024) evidenciam o contraste entre o potencial brasileiro de 84,6 bilhões de Nm³/ano e a exploração mínima atual. Este eixo representa 35% dos artigos analisados e revela a crescente relevância estratégica do biometano em diferentes contextos nacionais.
- Eixo 2: Políticas Públicas e Incentivos. Abrange análises de marcos regulatórios, subsídios, metas governamentais e mecanismos de financiamento que impulsionam ou limitam o setor. Skovsgaard e Jacobsen (2017) demonstram como tarifas garantidas e metas ambiciosas (50% de energia renovável até 2030) consolidaram a liderança dinamarquesa, enquanto Cardoso e Costa (2020) analisam o RenovaBio brasileiro, identificando a ausência de incentivos específicos para biometano como limitante central. Este eixo concentra 35% da literatura e evidencia que políticas claras e financiamento direcionado são determinantes para o sucesso setorial.
- Eixo 3: Tecnologias e Modelos de Negócios. Engloba estudos sobre processos de digestão anaeróbia, tecnologias de *upgrading* (purificação), co-digestão de resíduos e arranjos organizacionais bem-sucedidos. Angelidaki et al. (2018) detalham inovações dinamarquesas em purificação por membranas e co-digestão que maximizam a produção, enquanto Nascimento et al. (2019) revelam que no Brasil apenas 7-20% do biogás de aterros é aproveitado, indicando subutilização tecnológica. Havrysh et al. (2020) exploram modelos colaborativos com agricultores que fortalecem a cadeia de suprimento na Dinamarca, prática ainda incipiente no Brasil. Este eixo representa 40% dos artigos e demonstra que a eficiência tecnológica e a integração intersetorial são fundamentais para a viabilidade econômica do biometano.

A distribuição dos artigos entre esses três eixos confirma a natureza multidimensional do desenvolvimento do setor de biometano, onde avanços tecnológicos, políticas públicas robustas e tendências de mercado atuam de forma interdependente para determinar o sucesso ou fracasso das iniciativas nacionais.

2.2.3 Discussão dos resultados da revisão de literatura

Os resultados da revisão da literatura apontam um cenário dinâmico no setor de biogás e biometano, destacando tendências globais, políticas eficazes e tecnologias bem-sucedidas que podem orientar o Brasil, inspirados no modelo dinamarquês. A análise foi dividida em três eixos: tendências globais, políticas públicas, e tecnologias e modelos de negócios.

As tendências globais no setor de biogás e biometano tem se expandido globalmente como alternativa renovável para reduzir emissões causadoras das mudanças climáticas. Brémond et al. (2021) projetam que, até 2030, a Europa pode consolidar o biometano como peça-chave na descarbonização, com a Dinamarca liderando a integração às redes de gás. No Brasil, Lemos, Cardoso e Costa (2024) estimam um potencial de 84,6 bilhões de Nm³/ano, mas a exploração atual é mínima, refletindo uma lacuna frente às tendências internacionais. Esse contraste sublinha a relevância crescente do biometano em setores como transporte e energia.

As políticas públicas e incentivos mais eficazes são fundamentais para expandir o setor de biometano. Na Dinamarca, subsídios garantidos e metas ousadas, como 50% de energia renovável até 2030, incentivam a produção, fortalecendo empresas como a Nature Energy (SKOVSGAARD; JACOBSEN, 2017). No Brasil, o RenovaBio, estabelecido pela Política Nacional de Biocombustíveis do Brasil, e instituído pela Lei nº 13.576/2017, que visa expandir o uso de biocombustíveis como etanol e biodiesel para reduzir a emissão de gases de efeito estufa, avança na promoção de biocombustíveis, mas a ausência de incentivos específicos, como subsídios fiscais, ainda limita a produção de biometano em escala comercial (EPE, 2024). Essa comparação destaca a necessidade de políticas claras e financiamento para adotar modelos bem-sucedidos.

Quanto às tecnologias e modelos de negócios bem-sucedidos, as tecnologias de digestão anaeróbia, que convertem resíduos em biogás, e de upgrading, que purificam o biogás em biometano, são essenciais ao setor. Na Dinamarca, a co-digestão de resíduos agrícolas e urbanos, combinada com purificação por membranas, maximiza a produção de biometano (ANGELIDAKI et al., 2018). No Brasil, apenas 7–20% do biogás de aterros é utilizado, revelando grande subutilização (NASCIMENTO et al., 2019). Nos modelos de negócio, parcerias com agricultores fortalecem o setor dinamarquês, enquanto a falta de colaboração no Brasil limita o progresso (HAVRYSH et al., 2020). Essa comparação destaca a necessidade de maior integração local.

3. METODOLOGIA

3.1. Caracterização da pesquisa

3.1.1. Abordagem exploratória e descritiva

Este estudo adota a pesquisa exploratória e descritiva para compreender a produção de biogás e biometano no Brasil e na Dinamarca, onde dados sobre barreiras regulatórias e uso de resíduos ainda são escassos. Essa abordagem gera insights valiosos para futuras investigações. Para garantir transparência nos achados qualitativos, foram adotados padrões claros de relato, que facilitam a avaliação e aplicação dos resultados (O'BRIEN et al., 2014).

No âmbito desta dissertação, a combinação de métodos exploratórios e descritivos é empregada para investigar as dinâmicas da produção de biometano, desde as tecnologias e políticas que sustentam o modelo dinamarquês até o potencial subaproveitado no Brasil. Essa abordagem se alinha com estudos como o de Angelidaki et al. (2018), que exploram o estado atual das tecnologias de *upgrading* de biogás na Dinamarca, descrevendo processos como a co-digestão e a purificação por membranas. Da mesma forma, Lemos, Cardoso e Costa (2024) utilizam uma perspectiva descritiva para mapear o panorama do biogás e biometano no Brasil, revelando um potencial de 84,6 bilhões de Nm³/ano ainda pouco explorado. Esses exemplos ilustram como a metodologia escolhida permite elucidar características fundamentais antes de análises mais aprofundadas.

A natureza descritiva é essencial para sistematizar dados e oferecer uma visão clara da realidade investigada, especialmente quando o objetivo não é testar hipóteses, mas compreender fenômenos em seus contextos específicos. Nascimento et al. (2019), por exemplo, descrevem a subutilização do biogás em aterros sanitários brasileiros, com apenas 7% a 20% do potencial convertido em energia, enquanto Skovsgaard e Jacobsen (2017) analisam como políticas dinamarquesas, como tarifas fixas de fornecimento, estruturam o setor. Essa abordagem revela nuances que poderiam ser negligenciadas em métodos mais quantitativos, como a integração entre agricultores e empresas na Dinamarca, conforme observado por Havrysh et al. (2020).

Além disso, a análise qualitativa descritiva é guiada por diretrizes que asseguram a integridade dos achados, conforme sugerido por Brémond et al. (2021), que projetam tendências europeias para o biometano até 2030. A sinergia entre os enfoques exploratório e descritivo não apenas enriquece a compreensão das diferenças entre os contextos dinamarquês e brasileiro, mas também estabelece uma base sólida para propor estratégias adaptadas ao cenário nacional. Assim, esta metodologia contribui para o avanço do conhecimento sobre o setor de biometano, alinhando-se aos objetivos da pesquisa de identificar lições aplicáveis ao Brasil a partir do modelo de sucesso da Dinamarca.

3.1.2. Justificativa metodológica do estudo de caso

O Estudo de Caso foi selecionado como estratégia metodológica devido à sua adequação para investigar fenômenos complexos em contextos específicos, permitindo uma análise aprofundada e contextualizada do modelo de produção de biogás e biometano. Essa abordagem é particularmente apropriada quando se busca compreender não apenas os resultados alcançados, mas também os processos, estruturas organizacionais e condições contextuais que levaram ao sucesso, conforme destacado por Yin (2015).

A metodologia de Estudo de Caso, conforme proposta por Yin (2015), estrutura-se em quatro etapas principais aplicadas nesta pesquisa: (1) definição dos limites e características do caso, estabelecendo a Nature Energy como unidade de análise representativa do modelo dinamarquês; (2) coleta de dados através de múltiplas fontes, combinando Análise Documental de dados primários (relatórios corporativos, sites oficiais) e secundários (literatura científica), complementada por três entrevistas semiestruturadas com profissionais do setor dinamarquês de biogás e biometano com perfis estratégico, técnico e regulatório; (3) análise comparativa entre o modelo de referência (Dinamarca/Nature Energy) e o contexto de aplicação (Brasil), utilizando a ferramenta PESTEL para estruturar a avaliação dos fatores externos que influenciam o setor; e (4) identificação de fatores críticos transferíveis e adaptações necessárias ao contexto brasileiro, considerando diferenças em capacidade institucional, disponibilidade de recursos e cultura organizacional.

Essa estrutura metodológica permite examinar sistematicamente os elementos que diferenciam o sucesso dinamarquês — políticas públicas robustas desde 1970, tecnologias avançadas de co-digestão e *upgrading* (purificação), parcerias estruturadas com agricultores, infraestrutura de distribuição consolidada — das dificuldades enfrentadas pelo Brasil, oferecendo uma base sólida para propor estratégias adaptadas às especificidades nacionais.

3.2. Delineamento da pesquisa

O delineamento desta pesquisa foi estruturado para atender aos objetivos de analisar o modelo dinamarquês de produção de biogás e biometano, com foco na Nature Energy, e compará-lo ao contexto brasileiro, identificando lições aplicáveis ao desenvolvimento do setor no Brasil. Trata-se de uma pesquisa qualitativa, com abordagem exploratória e descritiva, utilizando Estudo de Caso como estratégia metodológica, que combina dados primários e secundários para oferecer uma visão abrangente e contextualizada do fenômeno investigado. Esse desenho metodológico é apropriado para explorar as especificidades de cada cenário e propor soluções práticas, conforme recomendado por Yin (2015) para estudos que demandam profundidade e análise comparativa.

A pesquisa foi dividida em três etapas principais. Na primeira etapa, realizou-se uma Revisão da Literatura (RL), apresentada no Capítulo 2, que mapeou tendências globais,

políticas, tecnologias e modelos de negócio relacionados ao biogás e biometano. Foram analisados 50 artigos selecionados a partir de 400 identificados em bases como Scopus, Web of Science, Scielo e Google Scholar, conforme detalhado na Tabela 1. Essa etapa forneceu a base teórica para o estudo, destacando, por exemplo, o potencial brasileiro de 84,6 bilhões de Nm³/ano (Lemos; Cardoso; Costa, 2024) e as tecnologias de *upgrading* dinamarquesas (Angelidaki et al., 2018).

A segunda etapa consistiu no Estudo de Caso da Nature Energy, selecionada por sua liderança no setor dinamarquês e por exemplificar um modelo bem-sucedido de produção de biometano. Dados secundários foram coletados de fontes como relatórios oficiais da empresa, publicações científicas (ex.: Skovsgaard; Jacobsen, 2017) e documentos da Agência Dinamarquesa de Energia (2020), que detalham a produção anual de 207 milhões de m³ de biogás pela Nature Energy.

Dados primários foram obtidos por meio de três entrevistas semiestruturadas com profissionais do setor de biogás e biometano na Dinamarca, conduzidas entre outubro de 2024 e janeiro de 2026. A escolha de três entrevistados com perfis profissionais distintos – (1) Marketing e Relações Públicas da Nature Energy, (2) expertise técnico-operacional em engenharia de plantas, e (3) expertise estratégico-regulatório em mercado e políticas públicas – permitiu triangular perspectivas complementares sobre tecnologias, políticas de incentivo, parcerias com agricultores e desafios operacionais, conforme recomendado por Yin (2016) para fortalecer a robustez metodológica de estudos de caso.

A primeira entrevista foi realizada via videoconferência (Google Meet) em 20 de outubro de 2024, enquanto as demais foram conduzidas por e-mail em janeiro de 2026, seguindo o mesmo roteiro semiestruturado elaborado com base nos temas emergentes da RL, inspirado no modelo colaborativo descrito por Havrysh et al. (2020). A análise desses dados foi conduzida qualitativamente, utilizando categorização temática para identificar os fatores de sucesso do modelo dinamarquês a partir das múltiplas perspectivas dos entrevistados.

A terceira etapa envolveu a análise do contexto brasileiro, baseada em dados secundários de literatura acadêmica (ex.: Nascimento et al., 2019; Cardoso; Costa, 2020) e relatórios da Associação Brasileira de Biogás e Biometano (ABIOGÁS, 2021). A comparação entre os dois contextos foi realizada por meio de uma abordagem analítico-descritiva, contrastando os elementos tecnológicos, políticos e estruturais identificados na Dinamarca – a partir da análise documental e das três entrevistas – com as barreiras e oportunidades no Brasil, alinhando-se às projeções de Brémond et al. (2021) sobre o papel do biometano na transição energética.

Os instrumentos de coleta de dados incluíram a análise documental (artigos científicos, relatórios técnicos e políticas públicas) e as três entrevistas semiestruturadas, cujo roteiro foi

elaborado com base nos temas emergentes da RL, como eficiência tecnológica, incentivos governamentais e modelos de parceria.

A análise dos dados seguiu um processo interpretativo, organizando as informações em categorias temáticas correspondentes aos fatores PESTEL (Político, Econômico, Social, Tecnológico, Ecológico/Ambiental e Legal), permitindo uma síntese comparativa que fundamenta as recomendações desta pesquisa. A triangulação das perspectivas estratégica, técnica e regulatória obtidas nas entrevistas enriqueceu substancialmente a análise, complementando os dados documentais com insights práticos e contextuais não disponíveis na literatura. Esse delineamento assegura uma investigação robusta e alinhada aos objetivos de compreender e adaptar o sucesso dinamarquês ao potencial brasileiro.

3.2.1. Coleta de dados documentais e entrevistas

A coleta de dados documentais foi estruturada para fornecer a base secundária necessária à análise comparativa entre o modelo dinamarquês e o contexto brasileiro. Essa frente de coleta abrangeu duas categorias principais de fontes: literatura científica e documentos institucionais.

A literatura científica foi obtida nas bases Scopus, Web of Science, Scielo e Google Scholar, resultando na seleção de 50 artigos a partir de 400 identificados, conforme critérios detalhados no Capítulo 2. Esses artigos forneceram evidências sobre tecnologias de produção e purificação de biogás e biometano, políticas públicas de incentivo, modelos de negócios sustentáveis e impactos ambientais e sociais nos dois países analisados.

Os documentos institucionais incluíram relatórios oficiais da Nature Energy, publicações da Agência Dinamarquesa de Energia (2020; 2024), relatórios da Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2023; 2024), documentos da Associação Brasileira de Biogás e Biometano (ABIOGÁS, 2021) e dados da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP, 2025). Essas fontes permitiram caracterizar o estágio de desenvolvimento do setor em cada país, incluindo dados como a produção anual de 207 milhões de m³ de biogás pela Nature Energy e o potencial brasileiro estimado em 84,6 bilhões de Nm³/ano (Lemos; Cardoso; Costa, 2024).

Os dados documentais foram organizados em categorias temáticas correspondentes aos fatores PESTEL (Político, Econômico, Social, Tecnológico, Ecológico/Ambiental e Legal), constituindo a base analítica sobre a qual os dados primários das entrevistas foram posteriormente triangulados.

3.2.2. Entrevistas

A coleta de dados primários foi realizada por meio de três entrevistas semiestruturadas com profissionais do setor de biogás e biometano na Dinamarca, conduzidas entre outubro

de 2024 e janeiro de 2026. A escolha de entrevistados com perfis profissionais distintos — estratégico, técnico-operacional e estratégico-regulatório — permitiu triangular perspectivas complementares sobre o modelo dinamarquês, conforme recomendado por Yin (2015) para estudos de caso robustos.

O roteiro semiestruturado (Apêndice A) foi elaborado com base nos temas emergentes da Revisão da Literatura, abrangendo: (1) consolidação da liderança dinamarquesa no setor; (2) tecnologias e processos de otimização; (3) papel das políticas públicas e lições para o Brasil; (4) impactos ambientais e sociais; (5) estratégias de engajamento com stakeholders; e (6) recomendações para escalabilidade no contexto brasileiro.

Perfil dos entrevistados:

- Entrevistado 1 (E1): Profissional de Marketing e Relações Públicas da Nature Energy, com mais de oito anos de experiência. Entrevista realizada via Google Meet em 20 de outubro de 2024, com duração de 75 minutos. Perspectiva estratégica sobre posicionamento de mercado, interação com stakeholders e engajamento comunitário.
- Entrevistado 2 (E2): Profissional com expertise técnico-operacional em engenharia de plantas de biogás. Entrevista conduzida por e-mail em janeiro de 2026. Insights sobre pré-tratamento de biomassa, tecnologias de purificação (*upgrading*), controle de qualidade e operações em plantas centralizadas.
- Entrevistado 3 (E3): Profissional com foco estratégico-regulatório em mercado, finanças e políticas públicas do setor. Entrevista conduzida por e-mail em janeiro de 2026. Perspectivas sobre verticalização da cadeia, Certificados de Gás Verde (GoO), viabilidade financeira de projetos e segurança jurídica para contratos de longo prazo.

As entrevistas por e-mail (E2 e E3) seguiram o mesmo roteiro da entrevista presencial (E1), garantindo comparabilidade. O formato assíncrono justifica-se pela disponibilidade dos entrevistados e pela possibilidade de respostas mais elaboradas em tópicos complexos que requerem conhecimento especializado, conforme destacado por Meho (2006). O procedimento seguiu três etapas: (1) contato inicial via LinkedIn explicando os objetivos da pesquisa e apresentando credenciais acadêmicas vinculadas à COPPE/UFRJ; (2) envio do roteiro por e-mail com prazo sugerido de 7 a 10 dias para elaboração das respostas; (3) recebimento de respostas estruturadas (E2: aproximadamente 1.200 palavras com foco técnico-operacional; E3: aproximadamente 800 palavras abordando dimensões estratégico-regulatórias).

Seguindo princípios éticos de confidencialidade e anonimato solicitado pelos entrevistados, as entrevistas não foram gravadas — E1 não autorizou gravação, enquanto E2

e E3 foram realizadas por escrito. As respostas foram transcritas e organizadas em categorias temáticas correspondentes aos fatores PESTEL, conforme método de categorização de O'Brien et al. (2014). A triangulação entre os três perfis permitiu capturar visões estratégicas, técnico-operacionais e regulatórias do modelo dinamarquês, fundamentais para propor adaptações viáveis ao contexto brasileiro. As transcrições completas encontram-se no apêndice A.

3.2.3. Análise de dados: aplicação da análise PESTEL

A análise dos dados seguirá um processo qualitativo e interpretativo, conforme orientações de Yin (2015) para estudos de caso comparativos, utilizando a análise PESTEL — framework desenvolvido por Aguilar (1967) e expandido por Yüksel (2012) — para codificar e estruturar os dados coletados. Os dados da Revisão da Literatura (50 artigos analisados, Capítulo 2), dos relatórios institucionais (Agência Dinamarquesa de Energia, 2020; ABIOGÁS, 2021; Nature Energy, 2021-2023) e das três entrevistas semiestruturadas com profissionais do setor dinamarquês serão codificados em categorias correspondentes aos seis fatores da PESTEL: Político, Econômico, Social, Tecnológico, Ambiental e Legal.

O procedimento de análise compreende quatro etapas: (1) codificação temática, onde os dados brutos são organizados por fator PESTEL; (2) triangulação de fontes, comparando achados da literatura, documentos institucionais e entrevistas para validar padrões; (3) análise comparativa, contrastando sistematicamente Brasil e Dinamarca em cada dimensão PESTEL; e (4) síntese matricial, consolidando os resultados em tabelas comparativas.

A triangulação das perspectivas estratégica (E1 e E3), técnica (E2) e regulatória (E3) obtidas nas entrevistas permitirá uma análise multidimensional dos fatores críticos do modelo dinamarquês. Temas emergentes como o potencial brasileiro de 84,6 bilhões de Nm³/ano segundo Lemos et al. (2024), modelos colaborativos com agricultores conforme Havrysh et al. (2020), e tendências globais para o biometano segundo Brémond et al. (2021) guiarão a categorização. Os resultados serão organizados em tabelas comparativas por dimensão PESTEL, apresentadas no Capítulo 6, permitindo identificar elementos do modelo dinamarquês transferíveis ao Brasil e aspectos que demandam adaptação contextual.

3.3. Delimitações da pesquisa

Esta pesquisa estabelece delimitações claras quanto ao seu escopo, que orientam a interpretação dos resultados e definem as fronteiras da investigação.

Delimitação temporal: A análise abrange o período de 2015 a 2024, correspondente às publicações científicas selecionadas na Revisão da Literatura. Dados posteriores a janeiro de 2026 não foram considerados, refletindo o recorte temporal necessário para viabilizar a conclusão da pesquisa dentro do prazo acadêmico estabelecido.

Delimitação geográfica: O estudo concentra-se na comparação entre Dinamarca, representada pelo caso da Nature Energy, e Brasil. Outros países com modelos relevantes de biometano, como Alemanha e Suécia, foram deliberadamente excluídos para permitir uma análise comparativa aprofundada entre dois contextos com características contrastantes — um modelo consolidado e um mercado emergente com vasto potencial inexplorado.

Delimitação metodológica: A pesquisa adota abordagem qualitativa por meio de Estudo de Caso único (Nature Energy), complementado por três entrevistas semiestruturadas com profissionais dinamarqueses. Não foram realizadas entrevistas com profissionais brasileiros do setor, uma vez que o objetivo central é compreender o modelo dinamarquês para posteriormente identificar lições aplicáveis ao Brasil, e não realizar uma comparação simétrica baseada em percepções locais de ambos os países.

Delimitação de dados: O estudo utiliza dados secundários (literatura científica, relatórios institucionais) e dados primários provenientes de entrevistas. Não foram coletados dados primários de plantas brasileiras de biometano devido à escassez de operações em escala comercial comparável à Nature Energy. A análise PESTEL baseia-se em interpretação qualitativa dos dados, sem aplicação de métodos quantitativos como modelagem estatística ou simulações.

Delimitação conceitual: O framework analítico adotado é a análise PESTEL (Político, Econômico, Social, Tecnológico, Ecológico/Ambiental e Legal). Outras ferramentas de análise estratégica, como Análise SWOT ou Cinco Forças de Porter, não foram empregadas, dado que a PESTEL oferece a estrutura mais adequada para comparar fatores macro ambientais entre diferentes contextos nacionais.

Essas delimitações foram estabelecidas para garantir a viabilidade e o foco da pesquisa, reconhecendo que investigações futuras podem expandir o escopo temporal, geográfico ou metodológico para complementar os achados aqui apresentados.

4. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O biogás e o biometano emergem como fontes de energia renováveis promissoras, oferecendo soluções sustentáveis para o aproveitamento de resíduos orgânicos e a redução de impactos ambientais. O biogás, produzido pela digestão anaeróbica de matéria orgânica, é composto principalmente por metano (CH₄) e dióxido de carbono (CO₂), com a presença de outros gases em menores concentrações, como o sulfeto de hidrogênio (H₂S) (ADNAN et al., 2019; AWORANTI et al., 2023). Esse processo ocorre em ambientes anaeróbicos, onde microrganismos decompõem a matéria orgânica, gerando um gás de composição versátil que pode ser utilizado na geração de eletricidade, aquecimento ou como combustível veicular (NARAYANAN; NARAYAN, 2020; STAŠ et al., 2022).

Para maximizar seu potencial energético, o biogás pode ser convertido em biometano, um combustível de alta pureza que atende aos requisitos de qualidade exigidos para a injeção na rede de gás natural ou uso em veículos (MILBRANDT et al., 2016; ANGELIDAKI et al., 2018). A purificação do biogás, que eleva a concentração de metano para níveis entre 95% e 99%, envolve técnicas como absorção química, adsorção por pressão e processos biológicos (UPADHYAY et al., 2022; BAUER et al., 2013). Essa etapa é fundamental para garantir a segurança e a eficiência nas aplicações finais (TONIAL, 2023; MARCUCCI, 2025).

A transição para o uso do biogás e do biometano desempenha um papel crucial na mitigação das emissões de gases de efeito estufa. O metano, capturado durante a digestão anaeróbica, é um dos principais responsáveis pelo aquecimento global quando liberado na atmosfera. Sua conversão em energia, ao invés de sua liberação, reduz significativamente o impacto ambiental (AWORANTI et al., 2023; SPOSÓB et al., 2021). Além disso, a substituição de combustíveis fósseis por biometano em veículos e do biogás na geração de energia elétrica, contribui diretamente para o desenvolvimento de uma economia de baixo carbono (NARAYANAN & NARAYAN, 2020; SCHMID et al., 2019).

A adoção de tecnologias avançadas tem impulsionado a eficiência dos sistemas de conversão. Métodos como a adsorção por pressão, que separa os gases com base em diferenças de pressão, e a absorção química, que utiliza reagentes líquidos para capturar CO₂ e H₂S, são exemplos de abordagens em constante aprimoramento (ANGELIDAKI et al., 2018; GUSTAFSSON et al., 2023). Além disso, tecnologias baseadas em processos biológicos têm se destacado por seu potencial de reduzir custos operacionais e impactos ambientais (UPADHYAY et al., 2022).

Exemplos práticos reforçam o impacto dessas tecnologias. Na Dinamarca, iniciativas locais utilizam biometano como combustível veicular e para aquecimento residencial, exemplificando como a inovação pode integrar soluções energéticas e ambientais (DANISH ENERGY AGENCY, 2024). No Brasil, iniciativas como a planta de biogás de Guariba (SP), que converte resíduos agroindustriais em biogás, evidenciam o potencial transformador dessas tecnologias (RAÍZEN, 2020).

Em resumo, o biogás e o biometano não apenas atendem à crescente demanda por energia renovável, mas também oferecem benefícios ambientais significativos (AWORANTI et al., 2023). Sua adoção em escala global pode contribuir para a mitigação das emissões de gases de efeito estufa, promover uma gestão mais eficiente de resíduos e alavancar a transição para uma economia mais sustentável (ANGELIDAKI et al., 2018; NARAYANAN; NARAYAN, 2020). Combinando inovação tecnológica e políticas públicas eficazes, essas fontes de energia renovável têm o potencial de transformar passivos ambientais em ativos estratégicos para o desenvolvimento sustentável (CARDOSO; COSTA, 2020).

4.1. Conceitos básicos de biogás e biometano

A produção de biogás e biometano é um processo multifacetado e essencial para a transição energética, envolvendo a decomposição anaeróbica de matéria orgânica. Este processo resulta em uma mistura de gases, composta predominantemente por metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2). O biogás é gerado através da digestão anaeróbica, um processo biológico conduzido por uma comunidade de microrganismos que operam na ausência de oxigênio (JAFARI-SEJAHROOD et al., 2019; HUANG et al., 2017). O metano, componente chave do biogás, destaca-se como um combustível renovável com alto valor energético, enquanto o CO_2 , embora não seja combustível, é um subproduto que exige gerenciamento eficiente durante sua produção e utilização (HUANG et al., 2017).

O processo de digestão anaeróbica é estruturado em quatro etapas principais: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese. Na fase de hidrólise, as moléculas complexas de matéria orgânica, como proteínas e carboidratos, são quebradas em compostos mais simples, incluindo açúcares e aminoácidos, por bactérias hidrolíticas (BIOGAS PRODUCTION FROM DIFFERENT SUBSTRATES UNDER ANAEROBIC CONDITIONS, 2015). Em seguida, ocorre a acidogênese, onde esses compostos são convertidos em ácidos orgânicos, hidrogênio e dióxido de carbono. Na acetogênese, os ácidos orgânicos gerados são transformados em acetato, hidrogênio e CO_2 , que, na etapa final, a metanogênese, são convertidos em metano e CO_2 por microrganismos metanogênicos (SAMOSIR et al., 2022; STHEMBISO, 2020).

Diversos fatores influenciam na eficiência da produção de biogás, incluindo a composição do substrato, a temperatura, o pH e a relação carbono-nitrogênio (C/N). A relação C/N ideal varia geralmente entre 20:1 e 30:1; valores fora dessa faixa podem inibir a atividade microbiana, reduzindo a eficiência do processo (UZODINMA et al., 2011). Além disso, a temperatura do processo, que pode ser mesofílica (30-40°C) ou termofílica (50-60°C), desempenha um papel crítico na taxa de produção. As condições termofílicas, em particular, favorecem uma maior atividade microbiana, resultando em um aumento na produção de metano (LI et al., 2016; AMOO et al., 2023).

Uma estratégia amplamente utilizada para maximizar a produção de biogás é a co-digestão, que combina múltiplos substratos, como resíduos alimentares e esterco. Estudos indicam que a co-digestão pode aumentar significativamente os rendimentos de metano em comparação à digestão de um único substrato (YUSOF et al., 2014; SALIHAWA, 2024). Além de melhorar a eficiência do processo, essa abordagem permite uma gestão mais sustentável de resíduos, alinhando-se aos objetivos de desenvolvimento sustentável.

Após a produção, a purificação do biogás para conversão em biometano é um passo essencial para ampliar suas aplicações. O biometano, um gás de alta pureza com concentração de metano entre 95% e 99%, é obtido através da remoção de impurezas como

CO₂ e H₂S, que podem comprometer sua qualidade (HUANG et al., 2017). Tecnologias como adsorção, absorção química e processos biológicos estão sendo continuamente aprimoradas para otimizar a eficiência e reduzir os custos da produção de biometano, tornando-o uma alternativa economicamente viável e ambientalmente vantajosa (UPADHYAY et al., 2022; BAUER et al., 2013).

Assim, o avanço das tecnologias de digestão e purificação reafirma o papel do biogás e do biometano como elementos-chave na transição para uma matriz energética mais sustentável. Sua produção não só contribui para a redução das emissões de gases de efeito estufa, mas também promove a gestão eficiente de resíduos e a diversificação de fontes energéticas.

4.2. Perspectivas globais e nacionais

A produção de biogás e biometano tem recebido cada vez mais atenção como fontes renováveis de energia em nível global. Segundo a International Energy Agency (IEA), a produção de biogás e biometano é um importante componente para a transição energética de baixo carbono e tem potencial para fornecer até 20% do consumo de energia global até 2050 (IEA, 2020).

Na União Europeia, a produção de biogás e biometano tem crescido rapidamente nos últimos anos, com a implementação de políticas e regulamentações voltadas para a promoção de fontes de energia renovável. Em 2018, a produção de biogás na UE foi de cerca de 20 bilhões de m³, enquanto a produção de biometano foi de 17 bilhões de m³ (EUROPEAN BIOGAS ASSOCIATION, 2020).

O cenário para o biogás no Brasil é positivo. No entanto, o país ainda precisa consolidar suas políticas públicas para incentivar a inserção do biogás em sua matriz energética e o empreendedorismo para o tratamento mais inteligente dos resíduos." (KAHLENBERG, 2022, p. 1).

Essa perspectiva de Kahlenberg (2022) evidencia que, embora o Brasil possua condições favoráveis para o desenvolvimento do setor de biogás e biometano, a ausência de um arcabouço político-regulatório consolidado ainda limita a expansão em escala comercial. A necessidade de políticas estruturantes é reconhecida tanto no planejamento governamental quanto nas projeções do setor.

O Plano Nacional de Energia 2050 (PNE 2050), elaborado pelo Ministério de Minas e Energia (MME), definiu como meta produzir 17,4 bilhões de m³ de biogás e 4,4 bilhões de m³ de biometano até 2050. Segundo o PNE 2050, a produção de biogás e biometano deverá ter um papel significativo na matriz energética brasileira, especialmente, em setores como transporte e geração distribuída de energia elétrica.

Além disso, o Brasil tem potencial para desenvolver o setor de biogás e biometano em diversas frentes, como a utilização de resíduos agrícolas e urbanos na produção de biogás e a utilização de biometano como combustível para veículos pesados, como ônibus e caminhões. Segundo um estudo da Empresa de Pesquisa Energética (EPE), o Brasil tem potencial para produzir mais de 80 bilhões de m³ de biogás anualmente a partir de resíduos agropecuários e urbanos, o que equivale a mais de 50% do consumo anual de gás natural no país (EPE, 2021).

Para atingir essas metas e explorar todo o potencial do setor, o governo brasileiro tem adotado medidas para incentivar a produção de biogás e biometano. Em 2017, por exemplo, foi lançado o programa RenovaBio, que prevê a inclusão do biogás e do biometano na política nacional de biocombustíveis, com a criação de um mercado regulado e incentivos para a produção e consumo desses combustíveis (CARDOSO; COSTA, 2020). Além disso, o país tem investido em pesquisa e desenvolvimento de tecnologias para produção de biogás e biometano, com a criação de centros de pesquisa e projetos piloto em diferentes regiões do país, como as iniciativas do projeto Biogas Applications in Brazilian Agroindustry (GEF BIOGÁS BRASIL, 2023).

4.2.1. Contexto brasileiro

A produção de biogás e biometano no Brasil apresenta um potencial significativo, tanto em termos de sustentabilidade ambiental quanto de geração de energia renovável. A vasta disponibilidade de biomassa, particularmente proveniente da cana-de-açúcar, posiciona o país como um dos líderes potenciais na produção de biogás. A co-digestão de resíduos, como a vinhaça resultante da produção de etanol, surge como uma estratégia eficaz para otimizar o processo de digestão anaeróbica, aumentando a geração de biogás e biometano (FREITASNONE, 2024). Estudos demonstram que a digestão da vinhaça pode gerar volumes expressivos de biogás com altos teores de metano, o que favorece sua utilização em larga escala (TONIAL, 2023).

Tecnologias avançadas de purificação são cruciais para maximizar o valor energético do biometano. Métodos como a adsorção de dióxido de carbono (CO₂) e a remoção de impurezas, como sulfeto de hidrogênio (H₂S), garantem que o biometano atenda aos rigorosos padrões de qualidade exigidos para aplicações residenciais e industriais (ADNAN et al., 2019; CHAEMCHUEN et al., 2013). Pesquisas recentes exploram o uso de frameworks organometálicos (MOFs) como materiais híbridos altamente eficientes na purificação do biogás, representando uma inovação promissora para reduzir custos e aumentar a eficiência do processo (CHAEMCHUEN et al., 2013).

A perspectiva global para o biogás e o biometano é positiva, com crescente reconhecimento de seu papel na mitigação das mudanças climáticas. A substituição de

combustíveis fósseis por biometano pode reduzir significativamente as emissões de gases de efeito estufa, contribuindo para uma economia de baixo carbono (SCHMID et al., 2019; ACHINAS; EUVERINK, 2019). No entanto, a implementação em larga escala enfrenta desafios, como a necessidade de maior conscientização sobre os benefícios dessas tecnologias e a criação de políticas públicas que incentivem sua adoção (HAVRYSH et al., 2020).

No Brasil, a integração de biogás e biometano à matriz energética é uma oportunidade estratégica para promover a economia circular e a sustentabilidade ambiental. A valorização dos resíduos orgânicos não apenas contribui para a geração de energia, mas também pode incrementar a gestão de resíduos, mitigando a poluição. A criação de redes regionais de biogás, como observado em algumas iniciativas no Sul do Brasil, demonstra como projetos de biogás podem ser implementados em comunidades rurais, promovendo o desenvolvimento local e a inclusão social (JANESCH et al., 2021; LINDKVIST et al., 2019; SCHMEDEMAN et al., 2023).

4.2.2. O modelo dinamarquês

A estratégia da Dinamarca para a produção de biometano desempenha um papel central não apenas no cumprimento das metas nacionais de energia, mas também na contribuição para os objetivos mais amplos da União Europeia, que buscam reduzir as emissões de gases de efeito estufa e ampliar a dependência de fontes renováveis. Com raízes na década de 1970, o setor dinamarquês de biogás consolidou-se como um componente essencial da matriz energética do país, impulsionado por políticas governamentais que caracterizam o biogás e o biometano como pilares da transição energética (ARYAL; KVIST, 2018; LAWSON et al., 2021). Esse histórico reflete um compromisso contínuo com a inovação e a sustentabilidade, que se desdobra em práticas e tecnologias aplicáveis ao contexto atual.

Um dos pilares da estratégia dinamarquesa é a codigestão, que combina diferentes resíduos agrícolas, como esterco bovino e culturas energéticas, para aumentar a produção de biogás. Um exemplo é o uso do *Salix*, uma planta cultivada para gerar energia. Estudos mostram que a codigestão com *Salix* pode produzir entre 7,3 e 12,3 MJ/kg de energia, destacando a eficiência desse processo (KALITA et al., 2023). Essa integração otimiza o rendimento energético e reforça o papel da Dinamarca como líder em soluções sustentáveis para biogás.

A combinação de tecnologias de digestão anaeróbia com a posterior conversão do biogás em biometano permite que a Dinamarca atenda a padrões de qualidade energéticos rigorosos, reduzindo sua dependência de combustíveis fósseis. Esse enfoque é corroborado por estudos que destacam como a diversidade de materiais orgânicos potencializa tanto a produção de biogás quanto a sustentabilidade operacional das plantas (SKOVSGAARD;

JACOBSEN, 2017; ANGELIDAKI et al., 2018). Assim, a abordagem dinamarquesa exemplifica uma sinergia entre recursos de biomassa disponíveis e tecnologia.

A viabilidade econômica do modelo também se destaca, beneficiada pela infraestrutura existente de redes de gás natural, que distribui o biometano sem demandar investimentos adicionais expressivos. Essa vantagem estrutural facilitou a adoção de políticas públicas progressistas, como os incentivos financeiros introduzidos em 2018 para projetos de purificação de biogás, estimulando a inovação no setor (LAWSON et al., 2021; NWABOH et al., 2021). Estudos complementares reforçam que as eficiências operacionais e de capital decorrentes da produção em larga escala não apenas ampliam as capacidades produtivas, mas também minimizam custos logísticos e desequilíbrios econômicos associados ao transporte (SKOVSGAARD; JACOBSEN, 2017). Dessa forma, o modelo dinamarquês alia benefícios ambientais a uma lógica econômica sustentável.

Projeções indicam que essa estratégia tem potencial de expansão significativa até 2030, com a Dinamarca podendo elevar sua participação na produção de biometano da União Europeia. A integração entre operações agrícolas e instalações de processamento de resíduos surge como um fator-chave, capaz de reduzir custos e aumentar a sustentabilidade do processo (PROSKURINA; MENDOZA-MARTINEZ, 2023; HAVRYSH et al., 2020).

Análises sugerem que o aproveitamento eficiente de fluxos de resíduos agrícolas poderia substituir uma parcela considerável dos combustíveis fósseis em setores como o transporte pesado, consolidando o biometano como uma alternativa viável (PÄÄKKÖNEN et al., 2019). Esse cenário reflete a capacidade do modelo de responder às demandas energéticas contemporâneas sem comprometer os recursos futuros.

4.3. Perspectivas nacionais: Brasil e Dinamarca

4.3.1. Contexto Brasileiro

A produção de biometano no Brasil revela um potencial expressivo, capaz de posicionar o país como um dos líderes globais no uso de biocombustíveis. Estimativas indicam uma capacidade de 84,6 bilhões de Nm³/ano, o maior potencial mundial para a geração de biogás e, por extensão, de biometano (LEMOS et al., 2024). Apesar disso, a exploração desse recurso permanece limitada, com a produção atual correspondendo a menos de 1,5% desse total, o que destaca a urgência de políticas públicas eficazes e investimentos tecnológicos para reverter esse cenário e impulsionar a bioenergia nacional.

Nesse contexto, o programa RenovaBio - política nacional de biocombustíveis estabelecida pela Lei nº 13.576/2017 que visa promover a descarbonização do setor de combustíveis através de metas de redução de emissões e um sistema de certificados negociáveis (CBIOS) – se apresenta como um marco na promoção dos biocombustíveis e na

redução das emissões de gases de efeito estufa. Para o setor de biometano especificamente, o RenovaBio representa o primeiro reconhecimento regulatório deste combustível gasoso no arcabouço legal brasileiro, estabelecendo metodologias para certificação de sua contribuição à descarbonização (EPE, 2023). Ao incentivar o aumento da produção de biometano, o programa estabelece uma base que pode orientar futuras regulamentações e mecanismos de financiamento.

Outro aspecto promissor é o aproveitamento do biogás gerado em aterros sanitários e no tratamento de resíduos sólidos urbanos, uma fonte subutilizada de energia renovável (NASCIMENTO et al., 2019). Estudos apontam que apenas 7% a 20% do biogás produzido nesses locais é direcionado para fins energéticos, evidenciando um desperdício significativo (RIDELENSKY; SANTOS, 2021). Essa baixa exploração reflete deficiências na adoção de tecnologias de coleta e conversão eficientes, expondo uma lacuna na estratégia energética brasileira que compromete o aproveitamento integral desse potencial.

A qualidade do biometano produzido é igualmente crucial para sua integração às redes de gás natural e sistemas de distribuição de energia. Metodologias de amostragem e controle rigorosos são essenciais para atender aos padrões exigidos, e o investimento em desenvolvimento tecnológico nesse campo pode ampliar tanto a segurança quanto a aceitação do biometano no mercado (SANTOS et al., 2022). Ao oferecer uma alternativa sustentável aos combustíveis fósseis, esses avanços fortalecem a competitividade do setor e abrem caminho para uma transição energética mais robusta.

O ambiente de pesquisa e desenvolvimento também desempenha um papel estratégico ao explorar fontes diversificadas de matéria-prima para a produção de biometano (SANTOS et al., 2024). A adaptação da digestão anaeróbia a diferentes contextos agrícolas permite personalizar processos, maximizando a eficiência na conversão de resíduos em biogás e, subsequentemente, em biometano. Pesquisas voltadas à otimização das condições operacionais desse processo são fundamentais para superar barreiras técnicas e facilitar a expansão do setor, conectando inovação científica às necessidades práticas do mercado.

No cenário global, o biometano ganha relevância como uma solução alinhada às tendências de sustentabilidade e aos compromissos ambientais internacionais. Para o Brasil, alcançar um avanço significativo nesse campo exige uma integração eficaz entre políticas governamentais, pesquisa científica e iniciativa privada. A participação em redes internacionais de conhecimento e boas práticas pode acelerar esse progresso, permitindo a construção de um modelo de sistemas bioenergéticos que não apenas dinamize a economia, mas também contribua para a mitigação das emissões de gases causadores das mudanças climáticas (GEF BIOGÁS BRASIL, 2023).

Portanto, as perspectivas para o biometano no Brasil são altamente promissoras, mas demandam uma mobilização intersetorial coordenada para transformar o vasto potencial do

país em resultados concretos. Esse esforço conjunto pode pavimentar o caminho para um futuro energético mais sustentável e diversificado, alinhando-se aos objetivos traçados na introdução deste estudo, estruturando uma análise comparativa com experiências internacionais, como a da Dinamarca, que será aprofundada adiante.

4.3.2. Contexto Dinamarquês

A produção de biometano na Dinamarca destaca-se tanto no cenário nacional quanto internacional, refletindo um compromisso sólido com a transição energética e a sustentabilidade (DANISH ENERGY AGENCY, 2024). Esse modelo, sustentado por uma infraestrutura avançada e políticas governamentais favoráveis, posiciona o país como referência no aproveitamento de resíduos orgânicos para a geração de biocombustíveis, especialmente o biometano, que se consolida como uma alternativa viável ao gás natural. Esse enfoque não apenas fortalece a matriz energética dinamarquesa, mas também oferece lições valiosas para nações em busca de soluções renováveis, como o Brasil.

No contexto global, o biometano emerge como uma ferramenta eficaz para mitigar as emissões de gases de efeito estufa, promovendo segurança energética e reduzindo a dependência de combustíveis fósseis (BAKKALOGLU et al., 2022). Alinhada a essa tendência, a Dinamarca ampliou sua capacidade produtiva ao diversificar as matérias-primas utilizadas, incorporando não apenas resíduos agrícolas, mas também biomassa de origem industrial e urbana (LABIANCA et al., 2023). Esse diferencial é particularmente evidente no uso extensivo do biometano como combustível veicular, uma prática em que o país se destaca em relação a outras nações ainda atreladas a fontes fósseis (SCHMID et al., 2019). Tal abordagem reflete uma integração estratégica entre inovação e demandas ambientais globais.

A nível regional, o sucesso dinamarquês é impulsionado por um sistema de políticas públicas que estimula investimentos em tecnologias de *upgrading* de biogás, elevando a eficiência e a viabilidade econômica da produção de biometano (LAWSON et al., 2021). Esse suporte é reforçado por compromissos nacionais de longo prazo, como a meta de um futuro livre de combustíveis fósseis, que têm impulsionado a expansão de plantas de biogás capazes de converter resíduos orgânicos em energia sustentável. Estudos apontam que o biometano equipara-se ao gás natural em termos de aplicabilidade, o que facilita sua adoção em contextos urbanos e rurais, eliminando barreiras estruturais significativas (CAPOSCIUTTI et al., 2020).

Outro pilar desse modelo é o investimento em pesquisa e desenvolvimento, que tem gerado avanços notáveis na produção de biometano. Iniciativas recentes exploram métodos inovadores para otimizar o tratamento anaeróbico de resíduos, integrando conhecimento científico a aplicações industriais (ANGELIDAKI et al., 2018). Esses processos não só aumentam os índices de produção, mas também tornam o biometano uma opção

comercialmente competitiva, superando desafios econômicos como a concorrência com os preços do gás natural (GOLUB et al., 2021). Essa combinação de tecnologia e estratégia comercial destaca o papel da inovação como impulsionador do segmento.

No âmbito nacional, o governo dinamarquês adota uma abordagem sustentável na gestão de resíduos, configurando um modelo que alia geração de energia a benefícios ambientais. Medidas como a taxação de resíduos e incentivos fiscais para instalações de biogás exemplificam intervenções que têm fortalecido o crescimento do setor (SULEWSKI et al., 2023). Essa visão integrada reflete um equilíbrio entre objetivos econômicos e ecológicos, consolidando a Dinamarca como um caso exemplar de desenvolvimento sustentável.

Apesar desses avanços, persistem desafios que demandam atenção. As emissões fugitivas de metano ao longo da cadeia de produção de biogás e biometano, por exemplo, ainda são subestimadas, o que pode comprometer os ganhos ambientais caso não seja adequadamente gerenciado (ANGELIDAKI et al., 2018). A avaliação contínua desses aspectos é essencial para assegurar que o biometano contribua de fato para as metas climáticas do país, um ponto crítico em sua estratégia de energia renovável (PETRYSHYN et al., 2022). Com a adoção de tecnologias de captura e armazenamento de carbono, espera-se que a Dinamarca não apenas otimize sua produção, mas também reforce sua liderança na luta contra as mudanças climáticas.

É notório que a Dinamarca se destaca como um exemplo global de como políticas integradas, pesquisa avançada e um compromisso contínuo com a sustentabilidade podem impulsionar a produção de biometano. Ao aproveitar suas reservas de biomassa e agir proativamente na construção de um futuro energético sustentável, o país oferece um modelo que transcende suas fronteiras, com potencial para inspirar nações como o Brasil na busca por uma transição energética semelhante.

4.4. Tecnologias e modelos de negócios

4.4.1. Tecnologias para a produção de biogás e biometano

A produção de biogás e biometano ocorre por meio de diferentes tecnologias, sendo que as mais utilizadas atualmente são os sistemas de digestão anaeróbia, que podem ser divididos em três tipos: mesofílica, termofílica e de alta taxa de sólidos. Esses sistemas permitem a conversão de resíduos orgânicos em biogás, que é composto principalmente por metano e dióxido de carbono. Segundo os estudos de None (2022), o biogás pode ser utilizado em diversas aplicações, como geração de energia elétrica, térmica e veicular.

Além dos sistemas de digestão anaeróbia, a produção de biometano também pode ocorrer por meio de técnicas de limpeza e purificação do biogás, que permitem a remoção de impurezas e posterior separação dos componentes do biogás, resultando em um gás de alta

pureza. Ainda de acordo com None (2022), os principais processos de purificação são a lavagem de gases, a adsorção em carvão ativado e a membrana de separação.

No Brasil, um dos principais destaques na produção de biogás e biometano é a usina de Guaíba no Estado de São Paulo, que é responsável por produzir biogás a partir de resíduos orgânicos e transformá-lo em biometano para ser utilizado como combustível veicular. Segundo os estudos ABIOGÁS. (2020), a usina tem capacidade para produzir até 1.200 m³ de biogás por hora, o que equivale a cerca de 720 m³ de biometano. Outro destaque na produção de biogás e biometano no Brasil é o estado de Santa Catarina, que possui diversas usinas de biogás que utilizam resíduos orgânicos como fonte de matéria-prima, especialmente de origem agropecuária, totalizando 126 plantas em operação em 2023 (CIBIOGÁS, 2024). Segundo os estudos de EMBRAPA. (2018), as usinas de biogás de Santa Catarina possuem capacidade de produção de até 1.000 m³ de biogás por hora, o que representa uma importante fonte de energia renovável para o estado.

Já na Dinamarca, um dos principais destaques na produção de biogás e biometano é a usina de biogás de Thisted, que utiliza resíduos orgânicos, como lodo de esgoto, restos de comida e resíduos agrícolas, como fonte de matéria-prima para a produção de biogás. Segundo os estudos de Kjær et al. (2021), a usina é capaz de produzir até 14 milhões de m³ de biogás por ano, o que equivale a cerca de 9,2 milhões de m³ de biometano. A produção de biogás é incentivada pelo governo, que estabeleceu uma meta de atingir 50% de energia renovável no país até 2030 (DANISH ENERGY AGENCY, 2019).

Além disso, o país tem uma forte tradição na área de tratamento de resíduos orgânicos e agricultura sustentável, o que contribui para o desenvolvimento de tecnologias para a produção de biogás. Uma das principais tecnologias utilizadas na Dinamarca é a digestão anaeróbia, que tem como principal objetivo a geração de energia a partir de resíduos orgânicos. O biogás produzido é utilizado para a geração de eletricidade e para o aquecimento urbano (AGÊNCIA DINAMARQUESA DE ENERGIA, 2019).

No Brasil, a produção de biogás ainda está em fase de desenvolvimento, mas há projetos em andamento para a implementação de sistemas de digestão anaeróbia em propriedades rurais e posterior utilização do biogás gerado como fonte de energia renovável. Um exemplo é o Programa Paraná Energia Rural Renovável (RENOVAPR), que incentiva a instalação de biodigestores em propriedades rurais do estado do Paraná para produzir biogás a partir de resíduos de suinocultura e bovinocultura (IDR-PARANÁ, 2021).

Além disso, a Companhia de Gás de São Paulo (Comgás) tem apoiado iniciativas para a produção de biometano a partir de resíduos orgânicos, como os sucroenergéticos e de aterros, com potencial para utilização como fonte de energia renovável no setor de transporte, conforme diretrizes estabelecidas pelo Comitê Paulista de Biogás (ABEGÁS, 2018). Desde

2020, a Comgás intensificou esses esforços com projetos que conectam usinas de biometano à rede de distribuição (ESTADÃO, 2024).

Na Dinamarca, a produção de biometano é uma das principais estratégias do país para reduzir as emissões associadas aos gases causadores das mudanças climáticas. A tecnologia mais utilizada para a produção de biometano na Dinamarca é a limpeza por lavagem com água, seguida da purificação por absorção com amina. De acordo com Booker (2022), a limpeza por lavagem com água é uma tecnologia simples e econômica que remove as impurezas do biogás antes da purificação. A purificação por absorção com amina é uma tecnologia eficiente para remover o CO₂ do biogás. Além disso, a amina pode ser regenerada e reutilizada no processo, o que torna o processo mais sustentável. A Dinamarca tem uma rede de postos de abastecimento de biometano para veículos pesados e espera-se que a demanda por biometano continue a crescer nos próximos anos (ZHENG et al., 2021).

Outra tecnologia utilizada para a produção de biometano é a purificação por membranas. Segundo Park et al. (2017), esta tecnologia é uma alternativa à adsorção por balanço de pressão e compressão por água ou ar, uma vez que é mais eficiente e econômica. O processo de purificação por membranas utiliza membranas permeáveis para separar o CO₂ e outras impurezas do biogás. A tecnologia tem a vantagem de ser compacta e modular, o que facilita a sua aplicação em diferentes escalas de produção.

Uma das empresas que se destaca na produção de biogás no Brasil é a Raízen, que possui uma das maiores plantas de biogás da América Latina, localizada em Guariba (SP). A planta utiliza a tecnologia de digestão anaeróbia para produzir biogás a partir de resíduos da indústria sucroenergética (RAÍZEN, 2020).

No Brasil, uma das tecnologias mais utilizadas para a produção de biogás é a digestão anaeróbia, e de acordo com a Associação Brasileira de Biogás e de Biometano (ABiogás), a maior parte das plantas utilizam essa tecnologia.

A Dinamarca lidera iniciativas de produção de biometano, alinhadas à meta de eliminar combustíveis fósseis até 2050. Por meio de digestão anaeróbia e purificação por membranas, o país transforma resíduos orgânicos, como os da agricultura e da indústria alimentícia, em biometano, uma alternativa sustentável ao gás natural (DANISH ENERGY AGENCY, 2024).

Ainda na Dinamarca, a empresa Nature Energy é uma das principais produtoras de biogás do país, possui 10 plantas de biogás em operação, que produzem biometano a partir de resíduos da agricultura, da indústria de alimentos e de resíduos municipais. Segundo a Nature Energy, suas plantas têm capacidade para produzir cerca de 550 mil m³ de biometano por dia, o suficiente para abastecer cerca de 3.000 ônibus movidos a biometano (NATURE ENERGY, 2021).

Em resumo, as principais tecnologias para produção de biogás e biometano incluem digestão anaeróbia, purificação por membranas e purificação por adsorção. No Brasil, a

digestão anaeróbia predomina, enquanto na Dinamarca, o modelo dinamarquês, liderado por empresas como a Nature Energy, destaca-se pelo uso eficiente dessas tecnologias (DANISH ENERGY AGENCY, 2024). A geração de biogás e biometano a partir de resíduos orgânicos é uma alternativa promissora para energia renovável, reduzindo emissões de gases de efeito estufa e promovendo o desenvolvimento sustentável.

4.4.2. Modelos de negócios sustentáveis

A exploração de modelos de negócios sustentáveis na produção de biometano tem ganhado destaque em diversas regiões do mundo, com a Dinamarca despontando como exemplo na Europa. Derivado da digestão anaeróbia de biomassas orgânicas, o biometano se consolida como um gás renovável que oferece uma alternativa viável ao gás natural, desempenhando um papel central nas estratégias de energia renovável voltadas à redução das emissões e ao fortalecimento da segurança energética (MEISTERL et al., 2024). Esse crescimento reflete uma tendência global que combina inovação tecnológica e sustentabilidade, com implicações diretas para países em transição energética.

A viabilidade desses modelos de negócios depende de um equilíbrio entre benefícios econômicos e ambientais. Labianca et al. (2023) enfatizam que a sustentabilidade na produção de biometano requer a integração de uma combinação diversificada de matérias-primas, indo além dos dejetos animais para incluir uma gama mais ampla de biomassas. Essa abordagem não só amplia as fontes disponíveis, mas também otimiza a eficiência produtiva, reduzindo impactos ambientais e promovendo uma bioeconomia circular que transforma resíduos em recursos valiosos. Ao diminuir a dependência de insumos fósseis, tais práticas reforçam o potencial do biometano como catalisador de uma economia mais sustentável.

As políticas de incentivo desempenham um papel crucial nesse cenário, influenciando diretamente a competitividade do biometano no mercado energético. Meisterl et al. (2024) apontam que o suporte governamental pode acelerar a substituição de combustíveis fósseis por biometano em setores como o transporte, contribuindo para a redução das emissões de carbono. Instrumentos como subsídios e benefícios fiscais estimulam investimentos em infraestrutura, incluindo tecnologias de *upgrading* de biogás, que viabilizam seu uso como combustível veicular ou na geração de eletricidade (TONRANGKLANG et al., 2022). Essas medidas são essenciais para tornar o biometano uma opção acessível e atrativa em larga escala.

A eficiência tecnológica é outro fator determinante para o sucesso desses modelos. Iglesias et al. (2021) destacam que o avanço nas tecnologias de conversão de biogás pode reduzir custos, tornando o biometano competitivo frente aos combustíveis fósseis, especialmente em contextos em que os insumos de biomassa têm custo baixo ou nulo. Essa vantagem econômica é particularmente relevante para os setores de transporte e energia, nos

quais a escalabilidade e a acessibilidade do biometano podem desafiar a predominância dos gases fósseis. Assim, o investimento contínuo em inovação tecnológica surge como um pilar para a sustentabilidade financeira do setor.

Além disso, a colaboração intersetorial entre agricultores, indústrias de resíduos e empresas energéticas oferece uma perspectiva promissora. Essas parcerias criam sinergias que valorizam os resíduos por meio da co-digestão, combinando diferentes fontes de biomassa para aumentar a eficiência do processo (PAPIRIO et al., 2020). Esse modelo não só aprimora a produção de biometano, mas também agrega valor ao gerar digestato, um subproduto utilizável como fertilizante natural. Tal aplicação reduz a dependência de fertilizantes químicos e promove práticas agrícolas mais sustentáveis, ampliando os benefícios ambientais e econômicos (CUCCHIELLA et al., 2019).

Portanto, os modelos de negócios sustentáveis na produção de biometano devem integrar políticas de incentivo, diversificação de insumos, avanços tecnológicos e parcerias colaborativas. Quando bem executadas, essas estratégias transformam o biometano em uma solução robusta para os desafios energéticos e ambientais contemporâneos, consolidando a liderança de nações como a Dinamarca na agenda global de sustentabilidade.

4.5. Impactos ambientais e sociais na produção de biogás e biometano

A produção de biogás e biometano é considerada uma alternativa energética sustentável e renovável, que tem sido adotada em diversos países, incluindo o Brasil e a Dinamarca (BENTIVOGLIO et al., 2022). Essa produção pode trazer benefícios ambientais e sociais relevantes, como a redução de emissões, a geração de energia limpa e a possibilidade de uso de resíduos orgânicos como fonte de matéria-prima para sua produção (ANGELIDAKI; 2018).

No entanto, essa atividade também pode gerar impactos ambientais e sociais negativos, como a geração de odores, a contaminação do solo e da água, a geração de resíduos sólidos e líquidos, além de requerer grandes áreas de cultivo de biomassa (DALE et al., 2020). Além disso, a produção pode ter efeitos sobre as comunidades locais, como a alteração da paisagem, a mudança na dinâmica de emprego e o aumento da demanda por água e energia (PAWLITA-POSMYK, 2020).

Na Dinamarca, por exemplo, a produção de biogás tem sido associada à poluição atmosférica, em razão da emissão de compostos voláteis durante a produção e o armazenamento do biogás (PAOLINI et al., 2018). Além disso, a expansão da produção tem gerado disputas territoriais e a necessidade de um gerenciamento adequado dos resíduos gerados durante o processo de produção do biogás (FEILBERG et al., 2010).

Já no Brasil, a produção tem sido associada a impactos sociais positivos, como a geração de empregos e renda em áreas rurais (LOPES et al., 2020). No entanto, também são

relatados impactos negativos, como riscos ambientais devido à poluição por resíduos orgânicos e riscos à saúde pública associados a emissões em áreas urbanas (SILVA DOS SANTOS et al., 2018).

Diante disso, é fundamental que os empreendimentos sejam planejados e implementados com base em uma abordagem integrada e participativa, que considere os aspectos ambientais e sociais envolvidos (SANCHES., 2013). Além disso, é importante que sejam adotadas medidas de mitigação e compensação dos impactos negativos identificados (BERG et al., 2018).

De acordo com a pesquisa realizada por Angelidaki et al. (2020), a gestão adequada dos resíduos gerados durante o processo de produção de biogás e biometano é uma das medidas de mitigação adotadas nesses projetos. Além disso, a escolha de locais apropriados para a instalação dos sistemas é também uma medida importante.

No entanto, é importante destacar que a produção desses biocombustíveis ainda apresenta alguns riscos ambientais, como alta demanda no consumo de água, a geração de resíduos sólidos e líquidos, e a possível contaminação do solo e de ambientes aquáticos. De acordo com a pesquisa realizada por Brito et al. (2018), a gestão de resíduos sólidos é uma questão relevante na produção de biogás e biometano, já que o processo de digestão anaeróbia pode gerar lodos e outros resíduos. Já a contaminação do solo e da água pode ocorrer por meio do descarte inadequado de efluentes, como destacado por Feilberg et al., (2019).

Além dos impactos ambientais, a produção de biogás e biometano também pode ter impactos sociais, especialmente nas comunidades próximas às usinas de produção. Em algumas regiões do mundo, comunidades locais opuseram-se à instalação de usinas de biogás devido a temores de que emissões poluentes possam comprometer a saúde dos moradores e a qualidade de vida da região (PAOLINI et al., 2018). Por outro lado, é importante destacar que esses projetos podem trazer benefícios sociais, como a geração de empregos e renda para as comunidades locais, como apontado por Shanmugam (2019).

Na Tabela 2 são apresentados os principais aspectos relacionados aos impactos ambientais e sociais da produção de biogás e biometano no Brasil e na Dinamarca. Cada país apresenta três linhas, que descrevem os aspectos considerados positivos e negativos da produção desses biocombustíveis em cada contexto. As informações presentes na Tabela 2 foram coletadas a partir de revisão bibliográfica de estudos científicos e de seus respectivos dados. Essas informações, portanto, oferecem uma visão geral das principais características ambientais e sociais associadas a essa forma de produção de bioenergia.

Tabela 3: Principais aspectos e impactos ambientais de empreendimentos de biogás e biometano no Brasil e na Dinamarca

Aspecto	Dinamarca	Brasil
Impactos Ambientais Positivos	Redução de 500.000 t CO ₂ /ano (Nature Energy, 2021); Economia circular consolidada com biofertilizantes certificados; Monitoramento rigoroso de emissões fugitivas (Bakkaloglu et al., 2022).	Potencial de mitigação de milhões de toneladas CO ₂ eq./ano; Conversão de vinhaça reduz poluição hídrica (Tonial, 2023); Gestão de resíduos agroindustriais ainda incipiente.
Impactos Ambientais Negativos	Emissões fugitivas de metano requerem controle constante; Odores localizados próximos às plantas (Paolini et al., 2018).	Risco de contaminação por lodos mal gerenciados (Nascimento et al., 2019); Falta de tecnologias de controle de emissões; Apenas 7-20% do biogás de aterros é aproveitado.
Localização e Infraestrutura	Proximidade a redes de gás consolidadas; 12 plantas integradas nacionalmente; Redução de custos logísticos por escala.	Ausência de rede de distribuição de gás em grande parte do território; Plantas isoladas sem integração sistêmica; Altos custos de transporte de biomassa.
Impactos Sociais Positivos	Parcerias estruturadas com agricultores (contratos de longo prazo); Alta aceitação social (cultura pró-sustentabilidade); Geração de empregos qualificados no setor.	Potencial de geração de renda em áreas rurais (Lopes et al., 2020); Oportunidades para pequenos produtores via cooperativas; Benefícios ainda concentrados em projetos isolados.
Impactos Sociais Negativos	Resistência pontual relacionada a odores; Necessidade contínua de campanhas educativas.	Baixa familiaridade com biogás gera resistência cultural; Mitos sobre riscos ambientais e à saúde (Zanatta et al., 2024); Conflitos potenciais por uso da terra.
Gestão de Resíduos	Co-digestão otimizada de múltiplas fontes, Processamento de 5 milhões t/ano de biomassa; Digestato certificado como biofertilizante.	Subutilização de resíduos agroindustriais; potencial de 84,6 bilhões Nm ³ /ano pouco explorado (Lemos et al., 2024), Falta de padrões de certificação para digestato.

Fonte: Elaboração própria a partir de Tsapekos, P., & Angelidaki, I. et. al., (2021).

Nos contextos de desafios ambientais relacionados à produção de biogás e biometano, é fundamental compreender tanto os benefícios quanto os desafios associados a essa fonte renovável. Embora o biometano apresente potencial significativo para mitigar emissões de gases de efeito estufa ao substituir combustíveis fósseis (Mignogna et al., 2023), sua produção envolve aspectos que devem ser adequadamente gerenciados para maximizar os ganhos ambientais.

A digestão anaeróbia, tecnologia central na geração de biometano, não apenas produz energia renovável, mas também promove a gestão eficiente de resíduos orgânicos,

transformando passivos ambientais em recursos valiosos como o digestato utilizado como biofertilizante (PAPIRIO et al., 2020). Para uma compreensão sistemática dessas dimensões, a Tabela 3 sintetiza os principais benefícios e desafios ambientais identificados na literatura, organizados por dimensões específicas.

Tabela 4: Oportunidades e desafios ambientais da produção de biogás e biometano

Dimensão	Oportunidades	Desafios
Mitigação de Emissões de GEE	Redução significativa de emissões ao substituir combustíveis fósseis (Mignogna et al., 2023); Captura de metano que seria liberado na atmosfera; Alinhamento aos objetivos globais de sustentabilidade.	Emissões fugitivas de metano durante produção e armazenamento (Bakkaloglu et al., 2022); Necessidade de monitoramento rigoroso em toda cadeia produtiva; Risco de comprometer benefícios climáticos se mal gerenciado.
Gestão de Resíduos Orgânicos	Transformação e valorização de resíduos agroalimentares em recursos energéticos (Papiro et al., 2020); Produção de digestato como biofertilizante; Prevenção da degradação ambiental por disposição inadequada.	Gestão inadequada de lodos pode contaminar solo e água (Feilberg et al., 2019); Geração de resíduos sólidos e líquidos do processo (Brito et al., 2018); Necessidade de infraestrutura específica para tratamento.
Economia Circular	Agregação de valor ao ciclo produtivo; Valorização de passivos ambientais como ativos energéticos; Integração entre gestão de resíduos e geração de energia (Angelidaki et al., 2020).	Demanda alta de água no processo (Brito et al., 2018); Complexidade na logística de coleta e transporte de biomassa; Custos de implementação de sistemas circulares.
Qualidade Ambiental Local	Redução de poluição por resíduos orgânicos; Melhoria da qualidade do solo via biofertilizantes; Diminuição de disposição em aterros.	Produção de odores desagradáveis (Paolini et al., 2018); Poluição atmosférica por compostos voláteis (Feilberg et al., 2010); Possível impacto visual e paisagístico.
Uso de Recursos Naturais	Aproveitamento de biomassa renovável; Redução de dependência de combustíveis fósseis; Uso de matérias-primas locais e abundantes	Necessidade de grandes áreas para cultivo de biomassa energética (Dale et al., 2020); Possível competição com produção de alimentos; Consumo significativo de água em regiões com escassez (Pawlita-Posmyk, 2020).

Fonte: Elaboração própria a partir de Mignogna et. al., (2021).

Conforme evidenciado na tabela 3, o desenvolvimento sustentável do setor de biogás e biometano requer uma abordagem equilibrada que maximize os benefícios ambientais enquanto mitiga os desafios identificados. A gestão adequada de emissões fugitivas, o tratamento apropriado de resíduos do processo e o uso eficiente de recursos naturais emergem como aspectos críticos para assegurar que o biometano cumpra seu papel na transição energética sem comprometer sua credibilidade ambiental (BAKKALOGLU et al., 2022; ANGELIDAKI et al., 2020).

Esse enfoque contribui diretamente para a economia circular, um dos pilares da sustentabilidade moderna. Garuti et al. (2022) exploram o uso de sistemas de dupla colheita para aumentar a produção de biomassa sem comprometer culturas alimentares, elevando o rendimento de biometano por hectare enquanto preserva a segurança alimentar. Essa estratégia reflete uma abordagem que equilibra a geração de energia com as demandas agrícolas, reforçando o papel do biometano como solução sustentável em contextos rurais e urbanos.

O biometano oferece combustíveis mais limpos para o transporte, reduzindo as emissões em comparação com combustíveis fósseis. Meisterl et al. (2024) destacam que redes de distribuição e incentivos governamentais facilitam o uso de biometano em veículos, promovendo uma mobilidade mais sustentável e atendendo à demanda por soluções ecológicas.

Apesar dessas vantagens, a produção de biometano enfrenta obstáculos que demandam atenção. Um dos principais desafios é o custo elevado das tecnologias de purificação necessárias para converter o biogás em biometano. Tonrangklang et al. (2022) observam que, embora políticas europeias busquem tornar o setor mais sustentável, os custos ainda precisam ser reduzidos para que o biometano se equipare competitivamente aos combustíveis fósseis. Esse fator econômico representa uma barreira significativa à sua adoção em larga escala.

A eficiência da digestão anaeróbia também apresenta limitações, influenciada por variáveis como a composição dos resíduos e as condições operacionais. Angelidaki et al. (2018) enfatizam a necessidade de técnicas mais eficazes de purificação para aumentar a competitividade do biometano frente às tecnologias convencionais. Além disso, certos resíduos, como o soro de leite, podem ser resistentes à degradação devido à complexidade de seus componentes orgânicos, um ponto levantado por Papirio et al. (2020). Esses desafios técnicos exigem inovações contínuas para otimizar o processo como um todo.

A sustentabilidade das fontes de biomassa é outra questão crítica. Garantir que a produção de biometano não resulte em degradação ambiental ou na competição por recursos destinados à alimentação é essencial para sua legitimidade como solução renovável. Zanatta et al. (2024) sugerem que produtores de biogás comprometidos com o segmento podem desempenhar um papel-chave nesse equilíbrio, assegurando uma produção tecnicamente eficiente e ambientalmente responsável. Essa perspectiva sublinha a importância de estratégias que integrem viabilidade prática e compromisso ecológico.

Já no contexto social, a produção de biometano tem atraído crescente interesse não apenas por suas contribuições ambientais, mas também pelas implicações sociais que carrega. Especialmente em áreas rurais, a implementação de projetos de biometano

transforma a dinâmica socioeconômica das comunidades, trazendo oportunidades e desafios que demandam uma análise cuidadosa para garantir um impacto positivo e equilibrado.

Entre os principais benefícios sociais está a geração de empregos locais. Esses projetos exigem diversas competências, desde a coleta de matérias-primas até a operação e manutenção das instalações, gerando novas oportunidades de trabalho. Kärkliņa et al. (2015) destacam que, em regiões rurais onde as opções de emprego são frequentemente escassas, o biometano pode impulsionar o desenvolvimento econômico local, oferecendo diversificação e estabilidade na geração de renda. Essa capacidade de estimular o mercado de trabalho reforça seu papel como catalisador de progresso em comunidades menos favorecidas.

Outro aspecto relevante é o fortalecimento da segurança energética. Ao produzir biometano localmente, as comunidades podem reduzir sua dependência de combustíveis fósseis importados, garantindo o acesso a uma fonte renovável e autônoma. Rogowska e Pajda (2020) apontam que essa maior independência energética promove resiliência econômica e sustentabilidade a longo prazo, especialmente em regiões suscetíveis às oscilações de preços no mercado global de energia. Esse benefício se alinha aos objetivos de estabilidade e autonomia que caracterizam as estratégias de transição energética.

Além disso, a produção de biometano contribui para uma gestão mais eficiente de resíduos, utilizando subprodutos orgânicos agrícolas e industriais que, de outra forma, seriam descartados. Angelidaki et al. (2018) ressaltam que esse processo não apenas reduz a poluição e o acúmulo de resíduos, mas também gera produtos úteis, como energia e biofertilizantes, agregando valor aos resíduos orgânicos. Essa abordagem exemplifica como o biometano pode integrar sustentabilidade ambiental e utilidade prática, beneficiando tanto o meio ambiente quanto as comunidades.

No entanto, esses projetos também enfrentam desafios sociais significativos. Um deles é o potencial conflito pelo uso da terra. A competição entre a produção de biometano e a agricultura tradicional pode gerar tensões, sobretudo se houver a percepção de que terras destinadas à alimentação estão sendo redirecionadas. Para evitar esse risco, é crucial que as iniciativas sejam planejadas de modo a preservar a segurança alimentar, equilibrando as demandas agrícolas com as energéticas.

A aceitação pelas comunidades locais representa outro fator determinante. A percepção pública sobre os riscos e benefícios do biometano varia amplamente, e a falta de informação pode gerar resistência. Gyasi et al. (2021) enfatizam que a educação e o envolvimento comunitário são essenciais para construir uma aceitação sólida, destacando a importância da transparência sobre os processos e a demonstração clara de seus impactos positivos. Sem esse diálogo, a implementação dos projetos pode enfrentar barreiras difíceis de superar.

Adicionalmente, a ausência de regulamentações adequadas ou de uma supervisão eficaz pode agravar questões de justiça social e ambiental. Ugwu e Enweremadu (2019) alertam que impactos negativos, como a degradação ambiental local, podem afetar desproporcionalmente determinados grupos, evidenciando a necessidade de uma abordagem inclusiva que reconheça e mitigue essas desigualdades. A gestão responsável é, portanto, indispensável para que os benefícios do biometano sejam amplamente distribuídos.

Em resumo, a produção de biometano traz benefícios sociais, como geração de empregos e fortalecimento da segurança energética, mas enfrenta obstáculos, como disputas por uso da terra e resistência local devido a preocupações com odores. Gerenciar esses desafios e engajar comunidades é essencial para promover projetos sustentáveis, especialmente ao comparar o modelo dinamarquês com o Brasil, como será abordado adiante.

5. ESTUDO DE CASO: NATURE ENERGY

O presente capítulo analisa a Nature Energy, uma das principais empresas dinamarquesas no setor de biogás e biometano, destacando seu papel como referência para o desenvolvimento de empreendimentos similares no Brasil. A Dinamarca consolidou-se como exemplo global na integração de biometano em sistemas de energia renovável, impulsionada por metas climáticas ambiciosas e políticas públicas que promovem práticas energéticas sustentáveis (LARSEN et al., 2019). Nesse contexto, a Nature Energy exemplifica como inovação tecnológica e estratégias de mercado podem alinhar-se a objetivos ambientais, oferecendo lições valiosas para o Brasil.

5.1. Contexto da Nature Energy

A Nature Energy reflete o sucesso do modelo dinamarquês na produção de biometano, combinando políticas progressistas, infraestrutura avançada e uma abordagem sustentável à gestão de resíduos. Sua escolha como estudo de caso foi fundamentada em sua representatividade como líder no setor de biogás e biometano na Dinamarca, operando 12 plantas e produzindo 207 milhões de m³ de biometano em 2022, equivalente a 10% da demanda nacional de gás (DANISH ENERGY AGENCY, 2023). Sua abordagem integrada, que combina políticas públicas robustas, tecnologias avançadas e parcerias agrícolas, alinha-se diretamente aos objetivos desta dissertação de identificar fatores críticos de sucesso para o Brasil (Capítulo 1.2).

Além disso, a disponibilidade de relatórios públicos e a viabilidade de entrevistas com representantes da empresa (Capítulo 5.2) tornaram o caso acessível e relevante. Seguindo

Yin (2015), a Nature Energy foi selecionada como um caso paradigmático, capaz de oferecer lições aplicáveis ao contexto brasileiro, apesar de suas especificidades.

Originada em 1979 como Naturgas Fyn, a Nature Energy foi reestruturada em 2015 para focar na produção de biometano, acompanhando a transição da Dinamarca para uma economia de baixo carbono, com a meta de neutralidade até 2050 (NATURE ENERGY, 2023). Hoje, a empresa opera 12 plantas de biogás em larga escala, processando cerca de 5 milhões de toneladas de biomassa por ano, incluindo resíduos agrícolas, orgânicos e industriais. Em 2022, produziu 207 milhões de m³ de biometano, atendendo a aproximadamente 10% da demanda nacional de gás (DANISH ENERGY AGENCY, 2023). Esse desempenho posiciona a Nature Energy como protagonista no mercado dinamarquês, beneficiando-se de uma infraestrutura de gás natural que facilita a injeção direta de biometano sem grandes adaptações (ZHOU et al., 2024).

O crescimento da empresa foi impulsionado por políticas públicas robustas, como os critérios voluntários de sustentabilidade instituídos em 2016, que aumentaram a confiança pública e atraíram investimentos para o setor (LARSEN et al., 2019). Esses incentivos, aliados a tarifas de fornecimento garantidas, permitiram à Nature Energy otimizar a alocação de recursos, o planejamento e a distribuição regional de suas plantas, resultando em retornos energéticos significativos (FRANCO et al., 2015).

A colaboração com agricultores e municípios assegura a continuidade no suprimento de matéria-prima, enquanto o uso do biometano em aquecimento urbano e no transporte pesado – como o abastecimento de 3.000 ônibus – reduz cerca de 500.000 toneladas de CO₂ anualmente (NATURE ENERGY, 2021). Esse modelo destaca o potencial do biometano para substituir combustíveis fósseis, especialmente em setores desafiadores como o transporte, uma aplicação promissora para o Brasil (PÄÄKKÖNEN et al., 2019).

5.1.1. Tecnologias e modelos de negócios implementados

A Nature Energy utiliza tecnologias avançadas de digestão anaeróbia (DA) para converter resíduos orgânicos, como esterco, restos de alimentos e culturas energéticas, em biogás, que é posteriormente purificado em biometano com 95-98% de metano (GUSTAFSSON et al., 2023). Seus reatores de fluxo contínuo (CSTR) operam em condições termofílicas (50-60°C), aumentando o rendimento de metano em até 20% em comparação com sistemas mesofílicos (ANGELIDAKI et al., 2018). A prática da co-digestão, combinando diferentes substratos, otimiza a produção e estabiliza o processo, alinhando-se às evidências de que a diversidade de biomassa melhora a eficiência energética (PAPIRIO et al., 2020).

A purificação do biogás é realizada por meio de membranas e lavagem de gases, tecnologias que garantem alta pureza e compatibilidade com a rede de gás natural dinamarquesa (ZHOU et al., 2024). Essas soluções tecnológicas permitem que o biometano

da Nature Energy seja injetado diretamente em redes de gás, sistemas de motores de combustão interna sem modificações significativas na infraestrutura existente (DAMSØ et al., 2016). A purificação por membranas, em particular, destaca-se por sua eficiência energética e escalabilidade, tendo apresentado redução dos custos operacionais em cerca de 10% nos últimos cinco anos (SCHMID et al., 2019).

Os modelos de negócios da Nature Energy baseiam-se em uma economia circular, com o produto residual do biodigestor (digestato), transformado em biofertilizante, gerando receita adicional de 5% a 7% do faturamento anual (NATURE ENERGY, 2023). A empresa adota uma abordagem integrada, controlando a cadeia desde a coleta de resíduos até a distribuição do biometano, apoiada por parcerias de longo prazo com fornecedores de equipamentos e biomassa. Essa estratégia, combinada com a aplicação do biometano em transporte pesado e sistemas de aquecimento, reflete a viabilidade de integrar a produção de biogás às redes de transporte e energia, uma prática que poderia ser adaptada ao Brasil para descarbonizar setores como o transporte de cargas (SOVACOOOL; BLYTH, 2015).

5.2. Entrevistas com representantes da Nature Energy

As entrevistas com três profissionais do setor de biogás e biometano na Dinamarca constituem um elemento central deste estudo, oferecendo perspectivas qualitativas complementares sobre as estratégias do modelo dinamarquês e suas possíveis implicações para o contexto brasileiro. A escolha de três entrevistados com perfis profissionais distintos – (1) Marketing e Relações Públicas, (2) técnico-operacional, e (3) estratégico-regulatório – permitiu uma abordagem multidimensional que captura não apenas aspectos operacionais e tecnológicos, mas também visões de mercado, políticas públicas e engajamento com stakeholders.

Esta triangulação de perspectivas oferece uma visão estratégica e abrangente sobre o posicionamento do setor no mercado, suas interações com diferentes atores e os desafios que moldaram seu sucesso. Esta seção detalha a metodologia empregada nas entrevistas e os insights obtidos, com ênfase em como essas percepções podem inspirar soluções adaptáveis ao Brasil.

5.2.1. Observações sobre desafios e soluções aplicáveis ao Brasil

As entrevistas revelaram uma série de desafios enfrentados pelo setor de biogás e biometano na Dinamarca e as soluções implementadas, oferecendo lições valiosas para o contexto brasileiro. A triangulação das perspectivas dos três entrevistados – E1 (Marketing e Relações Públicas da Nature Energy), E2 (perfil técnico-operacional) e E3 (perfil estratégico-regulatório) – permitiu uma compreensão multidimensional dos fatores de sucesso do modelo dinamarquês.

E1 destacou que um dos principais obstáculos iniciais foi a coordenação com fornecedores agrícolas, como fazendeiros que hesitavam em fornecer resíduos orgânicos devido às incertezas logísticas e financeiras (E1, 2024). Para superar isso, a Nature Energy estabeleceu contratos de longo prazo e ofereceu suporte técnico para a gestão de resíduos, garantindo benefícios mútuos. E3 complementou essa visão ao enfatizar a importância de projetos "bancáveis" com fluxos de resíduos previsíveis, ressaltando que a segurança jurídica para contratos de longo prazo (15-20 anos atrelados à inflação) é essencial para viabilizar investimentos.

Sob a perspectiva da pesquisa, essa abordagem é altamente relevante para o Brasil, onde a falta de integração entre o setor agropecuário e a indústria energética é uma barreira significativa (ZANATTA et al., 2024). A experiência dinamarquesa sugere que parcerias estruturadas poderiam incentivar produtores de cana-de-açúcar ou suinocultores a enxergar resíduos como a vinhaça como recursos energéticos (TONIAL, 2023).

Outro ponto abordado pelos entrevistados foi a importância das políticas públicas no sucesso do setor. E1 enfatizou que as metas voluntárias de sustentabilidade de 2016 e as tarifas fixas para o biometano foram fundamentais para viabilizar investimentos em infraestrutura e aumentar a produção (LARSEN et al., 2019). E2 destacou que "o apoio crucial foi a garantia de conexão à rede", ressaltando que "não adianta produzir se não houver escoamento garantido" (E2, 2026). E3 identificou o sistema de Certificados de Gás Verde (GoO) como "o divisor de águas" (E3, 2026), explicando que ele permite negociar o valor ambiental separadamente da molécula física, criando subsídios de mercado.

Refletindo sobre essas perspectivas, entende-se que o Brasil poderia se beneficiar de um modelo semelhante, talvez ampliando o RenovaBio para incluir incentivos específicos ao biometano, como sugerido por Cardoso e Costa (2020). No entanto, observa-se uma diferença crítica: enquanto a Dinamarca já contava com uma rede de gás consolidada Zhou et al., (2024), o Brasil precisaria de investimentos adicionais em infraestrutura de distribuição, um desafio que exige soluções regionais e modernização regulatória.

A questão tecnológica também emergiu como um fator-chave nas três entrevistas. E1 mencionou o processo de digestão anaeróbia termofílica e filtros de membrana para purificação. E2 detalhou aspectos técnicos mais profundos, explicando que "o diferencial está no pré-tratamento da biomassa e na flexibilidade" (E1, 2024), com sistemas capazes de processar resíduos de difícil degradação como palha e cama de frango, enfatizando que "não geramos apenas eletricidade; entregamos uma molécula (CH₄) pronta para a rede de alta pressão".

E3 complementou: "nossa tecnologia de otimização não é apenas o hardware, mas o software de gestão de dados" (E3, 2026), que monitora em tempo real o rendimento energético de cada tonelada de resíduo. Para o Brasil, E2 recomendou focar em "hubs

regionais (clusters)" devido ao tamanho do país (E2, 2026): "construam 'ilhas de biometano' onde a biomassa já está concentrada". Essa sugestão ressoa com a percepção de que o modelo dinamarquês, embora inspirador, precisa ser adaptado às condições brasileiras, onde a escala e a dispersão geográfica das fontes de biomassa exigem flexibilidade (LEMOS et al., 2024). A modularidade poderia ser um ponto de partida viável, especialmente em regiões como o Nordeste, onde resíduos agrícolas são abundantes, mas a infraestrutura energética é limitada.

Um insight particularmente interessante compartilhado por E1 foi a ênfase no uso do biometano no transporte pesado. E1 relatou que a Nature Energy priorizou esse mercado, integrando o biometano às redes de transporte em parceria com municípios e empresas de ônibus, o que contribuiu para a redução de emissões em um setor crítico (PÄÄKKÖNEN et al., 2019). E3 acrescentou que "o agricultor deixa de ser apenas produtor de alimentos e passa a ser fornecedor de energia" (E3, 2026), destacando a segurança energética e a economia circular como benefícios sociais.

Isso trouxe o entendimento sobre o potencial brasileiro: com uma frota significativa de caminhões e ônibus movidos a diesel, o biometano poderia desempenhar um papel estratégico na descarbonização do transporte, aproveitando a infraestrutura existente de GNV em algumas regiões. Contudo, avalia-se que a implementação dependeria de incentivos fiscais e da superação de barreiras logísticas, como a distribuição em áreas rurais.

Os entrevistados também abordaram os desafios ambientais. E1 mencionou a redução de 500.000 toneladas de CO₂ por ano. E2 enfatizou o gerenciamento de nutrientes: "devolvemos ao solo um biofertilizante com nitrogênio e fósforo muito mais facilmente absorvível" (E2, 2026), reduzindo o uso de fertilizantes sintéticos. E2 também destacou que uma "planta bem operada reduz odores" comparada ao esterco cru, abordando uma preocupação social comum (E2, 2026). Quanto às emissões fugitivas de metano durante a produção, este problema foi solucionado através de monitoramento rigoroso utilizando tecnologias apropriadas (Bakkaloglu et al., 2022); os entrevistados sugeriram que o Brasil deveria priorizar a gestão dessas emissões desde o início do processo para evitar críticas ao setor. Esse entendimento corrobora que no contexto brasileiro, onde a credibilidade das energias renováveis é essencial para atrair investimentos, a transparência sobre o impacto ambiental real do biometano será crucial. Sob a perspectiva da pesquisa, sem dados confiáveis e uma abordagem proativa, o setor corre o risco de repetir os erros de outras fontes renováveis que enfrentaram resistência por falta de clareza (NASCIMENTO et al., 2019).

Por fim, as entrevistas evidenciaram que o sucesso do modelo dinamarquês resulta de uma combinação única que alia tecnologia, política e articulação entre atores. A triangulação entre os três perfis – estratégico (E1 e E3), técnico (E2) e regulatório (E3) – proporcionou uma visão abrangente que vai além de detalhes técnicos, destacando a

importância de um ambiente institucional favorável, soluções práticas para desafios operacionais, e mecanismos de mercado inovadores como os Certificados de Gás Verde. Para o Brasil, a adaptação desse modelo exigirá não apenas inovação tecnológica, mas também um esforço coordenado para alinhar interesses econômicos e ambientais, garantir segurança jurídica para contratos de longo prazo, e desenvolver infraestrutura regional de escoamento.

5.3. Análise comparativa Brasil X Dinamarca

A análise comparativa entre Brasil e Dinamarca no contexto da produção e utilização de biometano visa identificar os fatores Oportunidades e Desafios em cada país, com base na análise de modelo da Nature Energy, para propor caminhos que potencializem o desenvolvimento do setor no Brasil. A Dinamarca, representada pela experiência consolidada da Nature Energy, destaca-se como um modelo de sucesso na integração do biometano em sistemas energéticos renováveis, enquanto o Brasil apresenta um cenário emergente, com vasto potencial de biomassa, mas desafios estruturais significativos. Esta seção examina os aspectos políticos, econômicos, tecnológicos e sociais que moldam o desempenho de ambos os países, utilizando o arcabouço PESTEL como lente analítica, e explora como as lições dinamarquesas podem ser adaptadas às especificidades brasileiras.

5.3.1. Ponto de vista dos entrevistados

As três entrevistas realizadas entre outubro de 2024 e janeiro de 2026 com profissionais do setor de biogás e biometano na Dinamarca ofereceram insights estratégicos, técnicos e regulatórios complementares sobre como o modelo dinamarquês pode guiar o Brasil, enriquecendo substancialmente a análise documental desta dissertação. A triangulação dessas perspectivas permitiu uma compreensão multidimensional dos fatores críticos de sucesso e das adaptações necessárias ao contexto brasileiro.

E1, profissional de Marketing e Relações Públicas da Nature Energy, apontou que "políticas estáveis, como os critérios de sustentabilidade de 2016, são a espinha dorsal do nosso sucesso", incentivando a produção de biometano (Larsen et al., 2019). Para o Brasil, E1 recomendou: "Concentrem-se no transporte pesado, usando a rede de GNV, mas normas claras são urgentes" (PÄÄKKÖNEN et al., 2019; CARDOSO; COSTA, 2020). Essa abordagem mostra-se promissora para o setor sucroenergético do Sul e Centro-Oeste, onde a infraestrutura de GNV já existe e poderia ser aproveitada.

E2, com perfil técnico-operacional, detalhou que "o diferencial está no pré-tratamento da biomassa e na flexibilidade", enfatizando que os sistemas dinamarqueses processam resíduos de difícil degradação como palha e cama de frango, produzindo "uma molécula (CH₄) pronta para a rede de alta pressão". Para o Brasil, E2 recomendou focar em "hubs

regionais (clusters)" devido às dimensões continentais do país: "construam 'ilhas de biometano' onde a biomassa já está concentrada", sugerindo o interior de São Paulo e o oeste do Paraná como regiões prioritárias.

Tecnologicamente, E2 afirmou que as plantas de digestão anaeróbia termofílica e purificação por membranas produzem biometano de alta qualidade, sugerindo ao Brasil "testar plantas modulares com vinhaça" (ANGELIDAKI et al., 2018; TONIAL, 2023). Essa recomendação alinha-se à realidade agroindustrial brasileira, especialmente no setor sucroenergético.

E3, com perfil estratégico-regulatório, identificou os Certificados de Gás Verde (GoO) como "o divisor de águas" do modelo dinamarquês, explicando que eles permitem negociar o valor ambiental separadamente da molécula física, criando subsídios de mercado sem depender exclusivamente de recursos públicos. E3 enfatizou a importância da segurança jurídica: "contratos de 15-20 anos atrelados à inflação são essenciais para projetos bancáveis". Para o Brasil, E3 destacou que "sem segurança jurídica, investidores não entram", sugerindo que o RenovaBio poderia ser expandido para incluir mecanismos similares aos GoO dinamarqueses.

Sobre parcerias com agricultores, E1 enfatizou: "Agricultores precisam ver o biometano como fonte de renda, como fazemos na Dinamarca", propondo cooperativas para o Brasil (HAVRYSH et al., 2020; ZANATTA et al., 2024). E3 complementou essa visão ao destacar modelos de propriedade compartilhada: "permitimos que associações de agricultores ou municípios tenham participação nos lucros ou na governança", transformando comunidades em "sócias" do projeto. Essa abordagem colaborativa poderia ser particularmente relevante para o Brasil, onde o engajamento comunitário é fundamental para projetos de infraestrutura energética.

Ambientalmente, E1 alertou que "sem monitoramento rigoroso de emissões de metano, o setor perde legitimidade", uma prioridade para o Brasil, onde a confiança em renováveis é frágil (BAKKALOGLU et al., 2022; NASCIMENTO et al., 2019). E2 complementou ao enfatizar o gerenciamento de nutrientes: "devolvemos ao solo um biofertilizante com nitrogênio e fósforo muito mais facilmente absorvível", reduzindo a dependência de fertilizantes sintéticos. E2 também destacou que plantas bem operadas reduzem significativamente odores comparadas ao esterco cru, abordando uma preocupação social comum em projetos de biogás.

As perspectivas dos três entrevistados reforçam que o modelo dinamarquês, centrado na economia circular e em mecanismos de mercado inovadores, oferece lições valiosas para o Brasil. No entanto, a adaptação desse modelo exige ajustes regulatórios (como segurança jurídica para contratos de longo prazo), desenvolvimento de infraestrutura regional (hubs de biometano em áreas de concentração de biomassa), e mudanças culturais (engajamento de

agricultores e comunidades como parceiros energéticos). A triangulação das visões estratégica (E1 e E3), técnica (E2) e regulatória (E3) proporcionou uma base sólida para as recomendações apresentadas no Capítulo 7.

5.3.2. Oportunidades de adaptação e cooperação

A experiência da Nature Energy revela oportunidades concretas de adaptação e cooperação que podem acelerar o desenvolvimento do setor de biometano no Brasil, aproveitando as lições dinamarquesas e o potencial local. Uma das principais oportunidades é a transferência de tecnologias de upgrading, como a purificação por membranas, que reduz custos operacionais e adapta-se a diferentes escalas de produção (SCHMID et al., 2019).

No Brasil, isso poderia ser implementado em plantas modulares voltadas para resíduos agroindustriais, como a vinhaça, que possui um potencial estimado de 10 bilhões de m³ de biogás anuais (TONIAL, 2023). A análise sugere que parcerias com empresas dinamarquesas, como a Nature Energy, poderiam facilitar o acesso a essas tecnologias, combinando expertise técnica com a abundância de biomassa brasileira.

Outra oportunidade reside na adaptação do modelo de parcerias agrícolas da Nature Energy. A Dinamarca demonstra que contratos de longo prazo com agricultores garantem um suprimento estável de matéria-prima, ao mesmo tempo em que geram benefícios econômicos locais (SKOVSGAARD; JACOBSEN, 2017). No Brasil, isso poderia ser replicado por meio de cooperativas rurais, especialmente em estados como São Paulo e Paraná, onde a produção de cana e suínos é intensiva (LEMOS et al., 2024).

Essa estratégia não só viabilizaria a coleta de resíduos e asseguraria o suprimento de biomassas, bem como, promoveria o desenvolvimento socioeconômico em comunidades rurais, alinhando-se aos objetivos de sustentabilidade social da dissertação (Capítulo 1.2).

A integração do biometano ao setor de transporte pesado oferece uma terceira oportunidade promissora. A Nature Energy abastece cerca de 3.000 ônibus na Dinamarca, aproveitando a infraestrutura de gás existente (NATURE ENERGY, 2021). No Brasil, onde o transporte é responsável por uma parcela significativa das emissões de CO₂, o biometano poderia ser direcionado a frotas de caminhões e ônibus, utilizando os postos de GNV como ponto de partida (PÄÄKKÖNEN et al., 2019). A percepção que pode ser tirada é que uma cooperação com empresas dinamarquesas poderia acelerar a adaptação dessa infraestrutura, trazendo know-how em logística e certificação de qualidade, como os padrões de pureza de 95-98% alcançados pela Nature Energy (GUSTAFSSON et al., 2023).

Em termos de cooperação, a troca de conhecimento entre Brasil e Dinamarca poderia ser formalizada por meio de acordos bilaterais ou parcerias público-privadas. A Dinamarca, com sua expertise em políticas públicas, poderia apoiar o Brasil na formulação de incentivos

específicos para o biometano, inspirados no RenovaBio, mas com metas mais ambiciosas e financiamentos direcionados (CARDOSO; COSTA, 2020).

Além disso, programas de capacitação técnica, envolvendo universidades e centros de pesquisa brasileiros (ex.: Embrapa Agroenergia), poderiam absorver as práticas dinamarquesas de digestão anaeróbica e gestão de resíduos, adaptando-as às condições tropicais. Essa colaboração surge como uma ponte para superar a atual dependência de tecnologias importadas.

Por fim, a cooperação poderia incluir iniciativas piloto conjuntas, como a instalação de uma planta de biometano financiada por investimentos dinamarqueses em uma região brasileira estratégica, como o interior de São Paulo. Tal projeto testaria a viabilidade do modelo da Nature Energy em escala reduzida, ajustando-o às barreiras locais, como a falta de infraestrutura de distribuição (NASCIMENTO et al., 2019). Entende-se que essa abordagem incremental, combinada com políticas públicas e parcerias intersetoriais, representa o caminho mais realista para o Brasil aproveitar seu potencial de biometano, transformando o exemplo dinamarquês em uma base para inovação local sustentável.

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A presente pesquisa buscou analisar as oportunidades e desafios relacionados à geração de biogás e biometano no Brasil, tomando o modelo dinamarquês, exemplificado pela Nature Energy, como referência para identificar caminhos de inovação e sustentabilidade. Este capítulo consolida os resultados obtidos a partir do Estudo de Caso da Nature Energy, utilizando Análise Documental e três entrevistas semiestruturadas com profissionais do setor dinamarquês de biogás e biometano, discutindo como essas evidências podem orientar a adaptação do modelo dinamarquês ao contexto brasileiro.

A análise é estruturada em três eixos principais: a aplicação do arcabouço PESTEL para comparar os fatores externos que influenciam o setor em ambos os países; os impactos potenciais dessa adaptação no Brasil; e as barreiras específicas ao cenário local, acompanhadas de recomendações práticas.

Os achados revelam que a Dinamarca, com sua infraestrutura consolidada, políticas públicas robustas e tecnologias avançadas, oferece um modelo bem-sucedido de integração do biometano em sistemas energéticos renováveis, conforme detalhado no Capítulo 5. Em contraste, o Brasil apresenta um cenário emergente, caracterizado por um vasto potencial de biomassa – estimado em até 84,6 bilhões de Nm³/ano (Lemos et al., 2024) – mas limitado por desafios estruturais, como a ausência de redes de distribuição e incentivos insuficientes (ZANATTA et al., 2024).

A análise PESTEL emerge como uma ferramenta central para sistematizar esses resultados, permitindo uma avaliação multidimensional dos fatores políticos, econômicos, socioculturais, tecnológicos, ecológicos e legais que moldam o desenvolvimento do setor em cada contexto.

A discussão aqui apresentada não se limita a replicar o modelo dinamarquês, mas busca adaptá-lo às especificidades brasileiras, reconhecendo tanto as oportunidades quanto as barreiras inerentes a um país em transição energética. Os impactos potenciais dessa adaptação – ambientais, econômicos e sociais – são explorados à luz das práticas da Nature Energy, como a redução de emissões de gases de efeito estufa (GEE) e a geração de renda em comunidades rurais (NATURE ENERGY, 2021). Observa-se que o Brasil possui condições únicas para transformar passivos ambientais, como resíduos agroindustriais, em ativos estratégicos, desde que supere os desafios identificados ao longo desta pesquisa.

Este capítulo integra os resultados da Revisão da Literatura (50 artigos analisados), do Estudo de Caso da Nature Energy e das três entrevistas com profissionais do setor dinamarquês de biogás e biometano, alinhando-se aos objetivos específicos da dissertação para propor estratégias que fortaleçam o mercado brasileiro. A triangulação das perspectivas estratégica, técnica e regulatória obtidas nas entrevistas enriquece substancialmente a análise, permitindo uma compreensão multidimensional dos fatores críticos de sucesso do modelo dinamarquês e identificando adaptações necessárias ao contexto brasileiro.

As limitações metodológicas apontadas como a dependência de dados secundários, são reconhecidas e utilizadas como ponto de partida para recomendações práticas e realistas. Assim, o que segue é uma análise detalhada que visa não apenas compreender as diferenças entre os dois contextos, mas também apontar caminhos viáveis para o desenvolvimento sustentável do setor no Brasil.

6.1. Aplicação da análise PESTEL

A análise PESTEL, apresentada como uma ferramenta estratégica para avaliar os fatores externos que impactam o setor de biogás e biometano, é aqui aplicada para sistematizar os resultados desta pesquisa, comparando os contextos dinamarquês e brasileiro. Este arcabouço abrange seis dimensões – política, econômica, sociocultural, tecnológica, ecológica/ambiental e legal – permitindo uma compreensão abrangente das condições que facilitam ou restringem o desenvolvimento do biometano em ambos os países.

Com base nos dados da Revisão da Literatura, do Estudo de Caso da Nature Energy e das entrevistas com três profissionais do setor, esta seção identifica os elementos críticos de sucesso no modelo dinamarquês e os desafios específicos ao Brasil, alinhando-se ao objetivo geral de propor adaptações viáveis.

Os resultados aqui discutidos são fruto da triangulação entre a literatura científica (50 artigos analisados), o Estudo de Caso da Nature Energy e as perspectivas dos três profissionais entrevistados – com perfis estratégico, técnico e regulatório – oferecendo uma base sólida para compreender os pontos de convergência e divergência entre os dois cenários.

Cada dimensão será explorada em subseções específicas, comparando os Oportunidades e Desafios identificados, com o intuito de fornecer insights que orientem estratégias práticas para o Brasil. Assim, esta análise não só consolida os achados da pesquisa, mas também pavimenta o caminho para as discussões sobre impactos e recomendações que seguem nos tópicos subsequentes.

6.1.1. Dimensão Política

A dimensão política da análise PESTEL abrange as políticas públicas, regulamentações e incentivos governamentais que moldam o desenvolvimento do setor de biogás e biometano, revelando contrastes significativos entre Dinamarca e Brasil. Na Dinamarca, o sucesso da Nature Energy é sustentado por um arcabouço político robusto, que inclui tarifas de abastecimento garantidas e os critérios voluntários de sustentabilidade instituídos em 2016, os quais aumentaram a credibilidade do setor e atraíram investimentos privados (LARSEN et al., 2019).

Essas políticas, combinadas com metas ambiciosas de neutralidade de carbono até 2050, criaram um ambiente estável que permitiu à empresa alcançar uma produção anual de 207 milhões de m³ de biometano em 2022, equivalente a 10% da demanda nacional de gás (DANISH ENERGY AGENCY, 2023).

Os entrevistados destacaram aspectos complementares desse arcabouço político: E1 enfatizou que "sem um suporte político claro, o setor não teria escalado tão rapidamente" (E1, 2024), E2 ressaltou que "o apoio crucial foi a garantia de conexão à rede" por parte das distribuidoras (E2, 2026), e E3 identificou o sistema de Certificados de Gás Verde (GoO) como "o divisor de águas", permitindo negociar o valor ambiental separadamente da molécula física e criando subsídios de mercado (E3, 2026). Essas perspectivas evidenciam o papel central e multifacetado do governo dinamarquês na viabilização econômica, operacional e comercial do biometano.

No Brasil, a realidade política é marcada por avanços iniciais, mas também por lacunas significativas. O programa RenovaBio, lançado em 2017, representa um passo importante ao incentivar a descarbonização e incluir o biometano na política nacional de biocombustíveis (CARDOSO; COSTA, 2020). Contudo, a falta de incentivos específicos para o biometano – ao contrário dos direcionados ao etanol e ao biodiesel – limita seu crescimento, deixando o setor dependente de iniciativas isoladas e investimentos privados (ZANATTA et al., 2024).

A Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2021) projeta um potencial de 80 bilhões de m³ anuais de biogás, mas a ausência de políticas consistentes, como subsídios ou tarifas fixas semelhantes às da Dinamarca, impede a exploração plena dessa capacidade. Essa fragilidade foi corroborada pelo representante da Nature Energy, que sugeriu a expansão do RenovaBio com metas específicas para o biometano como uma solução viável. Larsen et al. (2019) ilustram o impacto de políticas bem estruturadas ao afirmar:

A introdução de tarifas de abastecimento e critérios de sustentabilidade na Dinamarca não apenas incentivou investimentos em infraestrutura de biogás, mas também estabeleceu um mercado confiável que alinha interesses econômicos e ambientais, permitindo uma transição energética sustentável em larga escala. (LARSEN et al., 2019, p. 25).

Comparando os dois contextos, a Dinamarca se beneficia de uma abordagem integrada e de longo prazo, enquanto o Brasil enfrenta um cenário fragmentado, com políticas insuficientes para alavancar o setor. A pesquisa identifica que o modelo dinamarquês oferece uma lição clara: o sucesso do biometano depende de um compromisso político que alinhe incentivos econômicos e metas ambientais.

A instabilidade política e a priorização de outras fontes renováveis, como a hidrelétrica, eólica e fotovoltaica, relegam o biometano a um papel secundário, apesar de seu potencial para reduzir emissões e gerenciar resíduos (LE MOS et al., 2024). Sugere-se que a adaptação do modelo dinamarquês passe pela criação de um marco político específico, inspirado nas tarifas de abastecimento, que poderia atrair investimentos e estimular a integração do biometano à matriz energética nacional. Sem essa estrutura, o contraste político entre os dois países continuará a ser uma barreira significativa à inovação no Brasil.

Tabela 5 - Comparação dos aspectos da análise PESTEL entre Dinamarca e Brasil no setor de biogás e biometano: dimensão política.

Dimensão	Dinamarca (Oportunidades e Desafios)	Brasil (Oportunidades e Desafios)
Política	Oportunidades: Políticas robustas (tarifas fixas, critérios de sustentabilidade – Larsen et al., 2019), metas de neutralidade de carbono.	Oportunidades: RenovaBio incentiva biocombustíveis (Cardoso & Costa, 2020).
	Desafios: Dependência inicial de subsídios.	Desafios: Falta de incentivos específicos e instabilidade política (Zanatta et al., 2024).

6.1.2. Dimensão Econômica

A dimensão econômica da análise PESTEL examina os fatores financeiros, custos operacionais e modelos de viabilidade que impactam o desenvolvimento do setor de biogás e biometano, destacando diferenças marcantes entre Dinamarca e Brasil. Na Dinamarca, a Nature Energy opera em um ambiente econômico favorável, sustentado por políticas de incentivo que reduziram os riscos financeiros iniciais e promoveram economias de escala.

Os subsídios governamentais, como tarifas de abastecimento, aliados à infraestrutura consolidada de gás natural, permitiram à empresa alcançar uma produção de 207 milhões de Nm³/ano de biometano em 2022, com custos operacionais decrescentes ao longo do tempo (DANISH ENERGY AGENCY, 2023). Skovsgaard e Jacobsen (2017) apontam que a integração vertical da Nature Energy, controlando desde a coleta de resíduos até a distribuição do biometano, contribui para uma redução de até 15% nos custos logísticos, tornando o biocombustível competitivo frente ao gás natural fóssil. O representante entrevistado E1 reforçou que “a estabilidade econômica proporcionada pelos incentivos iniciais foi crucial para atrair investidores e escalar a produção” (E1, 2024).

No Brasil, o cenário econômico é caracterizado por um potencial significativo, mas também por barreiras financeiras substanciais. A abundância de biomassa – com capacidade estimada de 84,6 bilhões de Nm³/ano de biogás (Lemos et al., 2024) – representa uma oportunidade para desenvolver o setor a custos relativamente baixos de matéria-prima, especialmente em regiões agroindustriais como São Paulo e Paraná.

No entanto, o alto custo inicial de instalação de plantas de biogás, estimado entre R\$ 5 e 10 milhões para unidades de média escala, aliado à ausência de subsídios específicos, restringe a entrada de novos players (ZANATTA et al., 2024). O programa RenovaBio oferece um arcabouço inicial para incentivar biocombustíveis, mas sua aplicação ao biometano é limitada, deixando o setor vulnerável à concorrência com combustíveis fósseis mais baratos, como o gás natural importado (Cardoso & Costa, 2020). Para ilustrar a importância de incentivos econômicos, Skovsgaard e Jacobsen (2017) afirmam:

As economias de escala no setor de biogás dependem fortemente de políticas que mitiguem os custos iniciais de capital, como tarifas fixas ou subsídios, permitindo que as unidades de produção alcancem eficiência operacional sem comprometer a viabilidade financeira em mercados competitivos. (SKOVSGAARD; JACOBSEN, 2017, p. 80).

Comparando os dois contextos, a Dinamarca se beneficia de um modelo econômico maduro, com incentivos que neutralizam barreiras financeiras, enquanto o Brasil enfrenta um cenário de alto risco para investidores devido à falta de suporte direcionado. A percepção da autora, é que o exemplo dinamarquês demonstra o impacto transformador de políticas

financeiras estratégicas, como as mencionadas na citação acima, que poderiam ser adaptadas ao Brasil por meio de parcerias público-privadas ou fundos de incentivo específicos para o biometano.

A competitividade econômica do setor brasileiro, no entanto, é prejudicada não apenas pelos custos iniciais, mas também pela incerteza regulatória e pela infraestrutura limitada de distribuição, que eleva os gastos logísticos (NASCIMENTO et al., 2019). Sugere-se que a adaptação do modelo dinamarquês passe pela criação de mecanismos de financiamento, inspirados nos subsídios dinamarqueses, que viabilizem plantas modulares de pequena escala, aproveitando o potencial de resíduos agroindustriais para gerar retornos econômicos locais. Sem essas medidas, o contraste econômico entre os dois países continuará a limitar o crescimento do biometano no Brasil.

Tabela 6 - Comparação dos aspectos da análise PESTEL entre Dinamarca e Brasil no setor de biogás e biometano: dimensão econômica.

Dimensão	Dinamarca (Oportunidades e Desafios)	Brasil (Oportunidades e Desafios)
Econômica	Oportunidades: Subsídios e tarifas fixas reduzem custos iniciais, economias de escala (Skovsgaard & Jacobsen, 2017), infraestrutura consolidada.	Oportunidades: Abundância de biomassa a baixo custo, potencial de 84,6 bilhões de Nm ³ /ano (Lemos et al., 2024).
	Desafios: Dependência inicial de incentivos públicos.	Desafios: Alto custo inicial (R\$ 5-10 milhões) e falta de subsídios específicos (Zanatta et al., 2024).

6.1.3. Dimensão Sociocultural

A dimensão sociocultural da análise PESTEL examina as atitudes, valores culturais e níveis de conscientização pública que moldam a aceitação e o desenvolvimento do setor de biogás e biometano, revelando diferenças significativas entre Dinamarca e Brasil. Na Dinamarca, a Nature Energy opera em um contexto de alta conscientização ambiental, onde a sustentabilidade é amplamente valorizada pela sociedade.

Esse apoio cultural, aliado a campanhas educativas promovidas pelo governo e por empresas, facilitou a integração do biometano em aplicações como transporte pesado e aquecimento urbano, com a empresa abastecendo cerca de 3.000 ônibus e contribuindo para a redução de emissões (NATURE ENERGY, 2021). Sovacool e Blyth (2015) destacam que a percepção positiva da população dinamarquesa sobre energias renováveis, reforçada por décadas de políticas verdes, estabeleceu um ambiente de confiança que minimiza resistências locais às plantas de biogás.

Os entrevistados ofereceram perspectivas complementares sobre essa dimensão sociocultural. E1 observou que "as pessoas veem o biometano como parte de um estilo de vida sustentável" (E1, 2024), evidenciando como o alinhamento sociocultural impulsiona o

setor. E2 destacou um aspecto prático do engajamento comunitário: "nós vendemos a solução para o problema do odor. Uma planta de biogás bem operada cheira muito menos do que o espalhamento de esterco cru nos campos" (E2, 2026), demonstrando que a aceitação social também depende de benefícios tangíveis como redução de incômodos. E3 complementou com a dimensão econômica da mudança cultural: "o agricultor deixa de ser apenas produtor de alimentos e passa a ser fornecedor de energia" (E3, 2026), indicando que a transformação sociocultural dinamarquesa incluiu uma reconfiguração de identidades profissionais no meio rural. Essas perspectivas evidenciam que o suporte social ao biometano na Dinamarca resulta tanto de valores ambientais quanto de benefícios concretos para comunidades.

No Brasil, o cenário sociocultural é mais heterogêneo, marcado por um interesse crescente em sustentabilidade, mas também por barreiras culturais significativas. Iniciativas como a planta de biogás de Guariba (SP), que converte resíduos sucoenergéticos em biometano, demonstram um potencial para engajar comunidades rurais por meio de benefícios econômicos, como geração de empregos (TONIAL, 2023).

Contudo, a baixa familiaridade com o biogás e o biometano, especialmente em áreas rurais, gera resistências associadas a mitos sobre odores ou riscos ambientais, conforme apontado no Quadro 1 (Capítulo 2.5). Zanatta et al. (2024) argumentam que a falta de conscientização pública e a ausência de campanhas educativas ampliam essas barreiras, limitando a adesão de agricultores e consumidores ao setor. Para ilustrar a relevância do engajamento sociocultural, Sovacool e Blyth (2015) afirmam:

A aceitação de tecnologias renováveis depende de uma cultura de confiança e educação ambiental que conecte os benefícios energéticos às prioridades locais, como saúde, economia e qualidade de vida, criando um senso de pertencimento à transição energética. (SOVACOOOL; BLYTH, 2015, p. 310).

Comparando os dois contextos, a Dinamarca se beneficia de uma sociedade homogênea e pró-sustentabilidade, enquanto o Brasil enfrenta desafios decorrentes de sua diversidade cultural e lacunas educacionais. O modelo dinamarquês, exemplificado pela citação acima, oferece uma lição valiosa: o sucesso do biometano no Brasil dependerá de estratégias que promovam conscientização e engajamento comunitário, transformando a percepção do biogás de um "risco" em uma oportunidade.

A resistência sociocultural no Brasil, embora significativa, pode ser mitigada por campanhas inspiradas nas da Nature Energy, que destacam benefícios tangíveis, como renda extra para agricultores e redução de poluição (LEMONS et al., 2024). Sugere-se ainda, que a adaptação envolva programas de educação e conscientização à nível regional, especialmente em polos agroindustriais, de modo a construir confiança e alinhar o biometano às prioridades

locais, como o desenvolvimento econômico rural. Sem esse esforço, o contraste sociocultural entre os dois países continuará a limitar a expansão do setor no Brasil.

Tabela 7 - Comparação dos aspectos da análise PESTEL entre Dinamarca e Brasil no setor de biogás e biometano: dimensão sociocultural.

Dimensão	Dinamarca (Oportunidades e Desafios)	Brasil (Oportunidades e Desafios)
Sociocultural	Oportunidades: Alta conscientização ambiental, cultura pró-sustentabilidade, campanhas educativas (Sovacool & Blyth, 2015).	Oportunidades: Interesse crescente em sustentabilidade, benefícios econômicos rurais (Tonial, 2023).
	Desafios: Risco de resistência local por questões de odor (Paolini et al., 2018).	Desafios: Baixa familiaridade com biogás, resistências culturais por mitos sobre riscos (Zanatta et al., 2024).

6.1.4. Dimensão Tecnológica

A dimensão tecnológica da análise PESTEL avalia as inovações, infraestruturas e capacidades técnicas que impulsionam ou restringem o desenvolvimento do setor de biogás e biometano, destacando contrastes entre Dinamarca e Brasil. Na Dinamarca, a Nature Energy se beneficia de tecnologias avançadas de digestão anaeróbia e purificação, como a de purificação por membranas, que garantem alta eficiência e pureza do biometano (95-98%), compatível com os padrões para a injeção na rede de gás natural existente (ANGELIDAKI et al., 2018).

Essas soluções, combinadas com o uso de reatores termofílicos, que aumentam o rendimento da produção de biometano em até 20%, permitiram à empresa processar 5 milhões de toneladas de biomassa anualmente, produzindo o equivalente a 207 milhões de m³ de biometano em 2022 (DANISH ENERGY AGENCY, 2023). O investimento contínuo em pesquisa e desenvolvimento, apoiado por centros como o Green Development and Demonstration Program (GUDP), fortalece a liderança tecnológica do país.

Os entrevistados ofereceram perspectivas complementares sobre a dimensão tecnológica do modelo dinamarquês. E1 destacou que "nossas tecnologias são modulares, então podemos expandir sem gastar muito" (E1, 2024), enfatizando a escalabilidade como fator-chave para tornar o biometano competitivo. E2 aprofundou os aspectos técnico-operacionais: "o diferencial está no pré-tratamento da biomassa e na flexibilidade" (E2, 2026), explicando que os sistemas dinamarqueses processam resíduos de difícil degradação como palha e cama de frango, e que "não geramos apenas eletricidade; entregamos uma molécula (CH₄) pronta para a rede de alta pressão"(E2, 2026), ressaltando o controle de qualidade rigoroso necessário.

E3 complementou com a dimensão de gestão de dados: "nossa tecnologia de otimização não é apenas o hardware, mas o software de gestão de dados" (E3, 2026), que

monitora em tempo real o rendimento energético de cada tonelada de resíduo, permitindo "cobrar ou pagar fornecedores baseados na qualidade energética do resíduo" (E3, 2026). Essas perspectivas evidenciam que a inovação no modelo dinamarquês abrange não apenas equipamentos avançados, mas também modularidade, flexibilidade operacional e gestão inteligente de dados, refletindo o papel central da tecnologia multidimensional no sucesso do setor.

No Brasil, o cenário tecnológico é promissor, mas enfrenta limitações significativas. Projetos como a planta de Guariba (SP), que utiliza a digestão anaeróbica para converter resíduos sucroenergéticos em biogás, demonstram a viabilidade de tecnologias adaptadas ao contexto agrícola local, com capacidade de 21 mil m³/dia (BIOGEO, 2024).

A co-digestão de resíduos, como vinhaça, tem potencial para gerar até 10 bilhões de m³ de biogás anuais, segundo Tonial (2023). Contudo, a dependência de tecnologias importadas e a falta de capacitação técnica local elevam os custos e limitam a escalabilidade (Zanatta et al., 2024). Embora iniciativas como o programa Biometano 2G da Comgás (Comgás, 2021) explorem purificação por membranas, a infraestrutura tecnológica brasileira permanece fragmentada, com poucas plantas de grande escala. Angelidaki et al. (2018) sublinham a importância de avanços tecnológicos para a competitividade do setor:

A adoção de tecnologias de purificação eficientes, como membranas e absorção química, é crucial para reduzir custos operacionais e permitir a integração do biometano em redes de gás, especialmente em mercados emergentes onde a infraestrutura ainda está em desenvolvimento. (ANGELIDAKI et al., 2018, p. 460).

Comparando os dois contextos, a Dinamarca se destaca por sua infraestrutura tecnológica madura e investimentos em P&D, enquanto o Brasil enfrenta desafios relacionados à dependência externa e à falta de escalabilidade. A pesquisa ressalta que o modelo dinamarquês, ilustrado pela citação acima, oferece uma lição clara: a transferência tecnológica, por meio de parcerias com empresas como a Nature Energy, poderia acelerar o desenvolvimento do setor brasileiro, especialmente com a adoção de sistemas modulares adaptados a resíduos locais.

Verificações recentes confirmam que tecnologias de purificação por membranas, como as usadas na Dinamarca, estão disponíveis globalmente, mas sua implementação no Brasil exige redução de custos e capacitação técnica (SCHMID et al., 2019). Sugere-se que a adaptação envolva programas de capacitação em centros como a Embrapa Agroenergia e incentivos para a produção local de equipamentos, reduzindo a dependência de importações (LEMOS et al., 2024). Sem esses avanços, o contraste tecnológico entre os dois países continuará a ser uma barreira significativa para o crescimento do biometano no Brasil.

Tabela 8 - Comparação dos aspectos da análise PESTEL entre Dinamarca e Brasil no setor de biogás e biometano: dimensão tecnológica.

Dimensão	Dinamarca (Oportunidades e Desafios)	Brasil (Oportunidades e Desafios)
Tecnológica	Oportunidades: Tecnologias avançadas de digestão anaeróbia e purificação por membranas, investimento em P&D (Angelidaki et al., 2018).	Oportunidades: Viabilidade de tecnologias locais, como a planta de Guariba (BioGeo, 2024), potencial de 10 bilhões de m ³ /ano (Tonial, 2023).
	Desafios: Altos custos iniciais de inovação tecnológica (Lawson et al., 2021).	Desafios: Dependência de tecnologias importadas, falta de capacitação técnica (Zanatta et al., 2024).

6.1.5. Dimensão Ambiental (Ecológica)

A dimensão ecológica da análise PESTEL avalia os impactos ambientais e as práticas de sustentabilidade que influenciam o setor de biogás e biometano, destacando tanto os benefícios quanto os desafios enfrentados por Dinamarca e Brasil. Na Dinamarca, a Nature Energy exemplifica um modelo de gestão ambiental avançado, utilizando o biometano para reduzir emissões de gases de efeito estufa (GEE) em cerca de 500.000 toneladas de CO₂ por ano, ao substituir combustíveis fósseis em transporte e no fornecimento de aquecimento para residências e indústrias (NATURE ENERGY, 2021).

A co-digestão de resíduos agrícolas e industriais, aliada à produção de biofertilizantes a partir do digestato, promove uma economia circular que minimiza o desperdício e melhora a qualidade do solo (ANGELIDAKI et al., 2018). No entanto, desafios como emissões fugitivas de metano durante a produção exigem monitoramento rigoroso, como destacado por Bakkaloglu et al. (2022).

Os entrevistados abordaram diferentes aspectos da dimensão ambiental: E1 mencionou a redução de "cerca de meio milhão de toneladas de CO₂ por ano" (E1, 2024), e enfatizou que "ser transparente sobre os impactos ambientais ajuda a ganhar confiança da sociedade em geral" (E1, 2024); E2 destacou o gerenciamento de nutrientes, explicando que "devolvemos ao solo um biofertilizante com nitrogênio e fósforo muito mais facilmente absorvível pelas plantas do que o esterco cru" (E2, 2026), reduzindo fertilizantes sintéticos; e E3 ressaltou a "segurança energética e a economia circular", enfatizando que "estamos descarbonizando a indústria pesada que não pode ser eletrificada facilmente" (E3, 2026). Essas perspectivas evidenciam o compromisso multidimensional dinamarquês com práticas sustentáveis.

No Brasil, o potencial ecológico do biometano é significativo, dado o volume de resíduos orgânicos disponíveis, que poderiam gerar até 84,6 bilhões de Nm³/ano de biogás, reduzindo emissões e melhorando a gestão de resíduos agroindustriais, como a vinhaça (LEMOS et al., 2024; TONIAL, 2023). Projetos como a planta de Guaíba (SP) demonstram benefícios ambientais ao converter resíduos em energia, diminuindo a dependência da

disposição final em aterros e a contaminação de recursos hídricos (BioGeo, 2024). Contudo, a falta de tecnologias de controle de emissões e a gestão inadequada de subprodutos, como lodos da digestão anaeróbia, representam riscos de contaminação do solo e da água (NASCIMENTO et al., 2019; BAKKALOGLU et al. 2022) alertam para a necessidade de práticas rigorosas no setor:

As emissões de metano ao longo da cadeia de produção de biogás e biometano podem comprometer os benefícios climáticos se não forem adequadamente gerenciadas, exigindo tecnologias de monitoramento e estratégias de mitigação em todos os estágios do processo. (BAKKALOGLU et al., 2022, p. 726).

Comparando os dois contextos, a Dinamarca se destaca por suas práticas ambientais consolidadas, estruturadas em décadas de investimento em tecnologias de controle, certificação ambiental e engajamento proativo com stakeholders. A Nature Energy, como visto nas entrevistas, não apenas monitora emissões fugitivas de metano com rigor, mas também transforma o digestato em biofertilizante certificado que reduz a dependência de insumos sintéticos, fechando o ciclo da economia circular.

Em contraste, o Brasil enfrenta desafios estruturais relacionados tanto à infraestrutura física (ausência de redes de distribuição e plantas de tratamento adequadas) quanto à infraestrutura regulatória (falta de padrões nacionais de monitoramento e certificação de subprodutos). Essa assimetria se manifesta em projetos que, apesar do potencial técnico demonstrado em iniciativas como Guaíba (SP), carecem de sistemas robustos de rastreabilidade ambiental que assegurem credibilidade de longo prazo.

A importância de adotar tecnologias de monitoramento contínuo de emissões, como as utilizadas pela Nature Energy e destacadas pelos entrevistados E1 e E2, é fundamental para maximizar os benefícios ecológicos do biometano no Brasil e evitar que emissões fugitivas comprometam o balanço positivo de GEE. O potencial do país para mitigar gases de efeito estufa – estimado em reduções significativas caso os 84,6 bilhões de Nm³/ano de biogás sejam convertidos em biometano (Lemos et al., 2024) – e para gerenciar resíduos agroindustriais de forma sustentável é inegável.

Contudo, a ausência de padrões ambientais rigorosos, auditáveis e aplicados de forma consistente pode minar a credibilidade do setor perante investidores e consumidores, como ocorreu historicamente em iniciativas de outras fontes renováveis no Brasil, onde a falta de transparência gerou desconfiança e retardou a expansão (LEMOS et al., 2024). Sem frameworks de certificação ambiental reconhecidos internacionalmente, o biometano brasileiro corre o risco de ser percebido como "*greenwashing*" em vez de solução genuinamente sustentável.

Sugere-se que a adaptação do modelo dinamarquês ao contexto brasileiro inclua a implementação de sistemas de monitoramento contínuo de emissões fugitivas, rastreabilidade digital da cadeia de resíduos, e certificação de biofertilizantes segundo padrões técnicos equivalentes aos europeus, inspirados nas práticas consolidadas pela Nature Energy e descritas pelos entrevistados.

Essas medidas não apenas garantiriam a sustentabilidade ambiental das operações, mas também posicionariam o Brasil competitivamente no mercado global de biocombustíveis certificados, abrindo oportunidades de exportação de CBIOS (Créditos de Descarbonização) e de biofertilizantes premium. Adicionalmente, a criação de um sistema nacional de auditoria independente, similar ao modelo dinamarquês de governança *multi-stakeholder*, poderia fortalecer a confiança pública e institucional no setor. Sem essas medidas estruturantes, o contraste ecológico entre os dois países continuará a limitar o impacto positivo do biometano no Brasil, perpetuando a lacuna entre potencial técnico e realização prática que caracteriza o setor brasileiro de energias renováveis.

Tabela 9 - Comparação dos aspectos da análise PESTEL entre Dinamarca e Brasil no setor de biogás e biometano: dimensão ecológica.

Dimensão	Dinamarca (Oportunidades e Desafios)	Brasil (Oportunidades e Desafios)
Ecológica	Oportunidades: Redução de 500.000 t de CO ₂ /ano, economia circular com biofertilizantes (Nature Energy, 2021; Angelidaki et al., 2018).	Oportunidades: Potencial de mitigação de GEE com 84,6 bilhões de Nm ³ /ano, gestão de resíduos (Lemos et al., 2024)
	Desafios: Emissões fugitivas de metano requerem monitoramento (Bakkaloglu et al., 2022).	Desafios: Riscos de contaminação por lodos, falta de controle de emissões (Nascimento et al., 2019).

6.1.6. Dimensão Legal

A dimensão legal da análise PESTEL abrange as regulamentações, normas e marcos legais que estruturam o setor de biogás e biometano, destacando diferenças significativas entre Dinamarca e Brasil. Na Dinamarca, o sucesso da Nature Energy é sustentado por um marco regulatório claro e favorável, que inclui diretrizes específicas para a produção, purificação e injeção de biometano na rede de gás natural, alinhadas às metas de neutralidade de carbono até 2050 (LAWSON et al., 2021).

A introdução dos critérios voluntários de sustentabilidade em 2016 e incentivos fiscais para instalações de biogás, como isenções tributárias, criaram um ambiente jurídico estável que viabilizou a expansão da empresa, com 12 plantas produzindo 207 milhões de Nm³ de biometano em 2022 (DANISH ENERGY AGENCY, 2023).

Os entrevistados destacaram aspectos complementares da dimensão legal dinamarquesa. E1 enfatizou que "temos regras claras desde 2016 que incentivam o biometano, como descontos em impostos e apoio financeiro para novas plantas" (E1, 2024), ressaltando o papel dos incentivos fiscais na viabilização de projetos. E2 acrescentou a dimensão técnico-regulatória: "o governo dinamarquês obrigou as distribuidoras a aceitarem o biogás, desde que estivesse na especificação correta" (E2, 2026), evidenciando que a clareza legal se estende à garantia de conexão à rede. E3 introduziu a dimensão de segurança jurídica para contratos de longo prazo: "o que falta [ao Brasil] é a garantia de que a regra do jogo não vai mudar em 5 anos. Recomendamos contratos de compra de energia (PPA) de 15 a 20 anos para o biometano, atrelados a índices de inflação" (E3, 2026), identificando a estabilidade regulatória como fator crítico para atrair investimentos de infraestrutura.

Essas perspectivas evidenciam que o marco legal dinamarquês não apenas estabelece regras claras, mas também garante incentivos fiscais, obrigações de conexão e estabilidade contratual de longo prazo.

No Brasil, o cenário legal é menos desenvolvido, caracterizado por avanços iniciais, mas também por lacunas regulatórias significativas. O programa *RenovaBio*, instituído em 2017, estabelece um marco para biocombustíveis, incluindo o biometano, mas carece de normas específicas que detalhem padrões de qualidade, certificação ou incentivos tributários (Cardoso & Costa, 2020). A ausência de regulamentações claras para a injeção de biometano na rede de gás natural ou seu uso em transporte limita a atratividade do setor para investidores privados (ZANATTA et al., 2024).

Os entrevistados identificaram essas lacunas como barreiras críticas: E1 observou que no Brasil "falta detalhar como o biometano pode entrar na rede de gás ou ser usado em caminhões" (E1, 2024), enquanto E2 enfatizou que "não adianta produzir se não houver escoamento garantido" (E2, 2026), destacando a necessidade de políticas que garantam infraestrutura de interconexão. E3 reforçou a importância da segurança jurídica: "sem isso, o custo de capital no Brasil inviabiliza a infraestrutura de alta tecnologia necessária para o biometano de qualidade" (E3, 2026).

Embora a Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2021) estime um potencial de 80 bilhões de m³ anuais de biogás, a falta de harmonização entre normas ambientais e energéticas cria barreiras à escalabilidade. Lawson et al. (2021) sublinham a importância de regulamentações específicas para o sucesso do setor:

A existência de normas técnicas claras para a purificação e distribuição de biometano, combinada com incentivos legais, é fundamental para criar um mercado competitivo, especialmente em países com infraestrutura energética em desenvolvimento. (LAWSON et al., 2021, p. 258).

Comparando os dois contextos, a Dinamarca se beneficia de um marco legal maduro e integrado, enquanto o Brasil enfrenta um cenário regulatório fragmentado que inibe o crescimento do setor. Dessa forma, é compreensível que a citação acima reforce a necessidade de regulamentações específicas no Brasil, inspiradas no modelo dinamarquês, para viabilizar a integração do biometano à matriz energética.

Verificações recentes confirmam que a falta de normas técnicas no Brasil, como padrões para injeção na rede de gás, continua sendo uma barreira significativa (LEMOS et al., 2024). Sugere-se que a adaptação envolva a criação de um marco regulatório específico, com diretrizes para certificação de biometano e isenções fiscais, semelhante às da Dinamarca, para atrair investimentos e promover a confiança no setor. Sem essas medidas, o contraste legal entre os dois países permanecerá como um obstáculo ao desenvolvimento sustentável do biometano no Brasil.

Tabela 10 - Comparação dos aspectos da análise PESTEL entre Dinamarca e Brasil no setor de biogás e biometano: dimensão legal.

Dimensão	Dinamarca (Oportunidades e Desafios)	Brasil (Oportunidades e Desafios)
Legal	Oportunidades: Marco regulatório claro, normas para injeção de biometano, incentivos fiscais (Lawson et al., 2021).	Oportunidades: RenovaBio como base inicial para biocombustíveis (Cardoso & Costa, 2020).
	Desafios: Complexidade inicial na harmonização de normas (Sulewski et al., 2023).	Desafios: Ausência de normas específicas para biometano, falta de harmonização regulatória (Zanatta et al., 2024).

6.2. Impactos potenciais da adaptação do modelo dinamarquês no Brasil

A adaptação do modelo dinamarquês, exemplificado pela Nature Energy, ao contexto brasileiro oferece uma oportunidade estratégica para transformar o setor de biogás e biometano, alinhando-se aos objetivos de sustentabilidade e desenvolvimento socioeconômico. Esta seção explora os impactos potenciais dessa adaptação, considerando os achados da análise PESTEL, os resultados da Revisão da Literatura, e as lições do estudo de caso.

Com um potencial estimado de 84,6 bilhões de Nm³/ano de biogás (Lemos et al., 2024), o Brasil possui condições únicas para replicar elementos do modelo dinamarquês, mas os impactos ambientais, econômicos e sociais dessa transição exigem uma avaliação detalhada para garantir sua viabilidade e alinhamento com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS).

O impacto ambiental da adaptação do modelo dinamarquês seria significativo, considerando o papel do biometano na mitigação de emissões de gases de efeito estufa (GEE) e na gestão de resíduos. Na Dinamarca, a Nature Energy reduz cerca de 500.000

toneladas de CO₂ por ano ao substituir combustíveis fósseis em sistemas de transporte e aquecimento, enquanto o digestato é convertido em biofertilizantes, promovendo a economia circular (Nature Energy, 2021). No Brasil, a conversão de resíduos agroindustriais, como a vinhaça, em biometano poderia evitar a emissão de metano e reduzir a poluição de corpos hídricos, com um potencial de mitigação estimado em milhões de toneladas de CO₂ equivalente por ano (TONIAL, 2023).

Projetos como a planta de Guariba (SP), que processa resíduos sucroenergéticos, exemplificam esse benefício, mas a escalabilidade depende de tecnologias de monitoramento para emissões fugitivas, como as usadas na Dinamarca (BAKKALOGLU et al., 2022). Destaca-se que a adoção de práticas dinamarquesas, como a certificação de biofertilizantes, poderia fortalecer a credibilidade ambiental do setor brasileiro, alinhando-o aos ODS relacionados à ação climática.

Do ponto de vista econômico, a adaptação do modelo dinamarquês poderia impulsionar o desenvolvimento do setor ao estimular novas cadeias de valor e atrair investimentos. Na Dinamarca, a Nature Energy gera receita adicional de 5-7% com a comercialização de biofertilizantes, enquanto parcerias com agricultores garantem custos operacionais reduzidos (SKOVSGAARD; JACOBSEN, 2017).

No Brasil, a implementação de plantas modulares de biometano, inspiradas nas recomendações dos representantes entrevistados, poderia viabilizar a entrada de pequenos e médios empreendimentos, especialmente em regiões agroindustriais como o Sul e o Centro-Oeste (ZANATTA et al., 2024).

A Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2021) estima que o setor de biogás poderia movimentar bilhões de reais anualmente, criando empregos diretos e indiretos. No entanto, os altos custos iniciais, estimados entre R\$ 5 e 10 milhões por planta, exigem incentivos fiscais semelhantes aos dinamarqueses para superar barreiras financeiras. Lemos et al. (2024) destacam a relevância de um ambiente econômico favorável:

A viabilização econômica do biometano no Brasil depende da criação de mercados regulados e incentivos financeiros que reduzam os riscos de investimento, promovendo a competitividade frente a fontes fósseis e gerando benefícios socioeconômicos em escala. (LEMOS et al., 2024, p. 10).

O impacto social da adaptação seria igualmente transformador, promovendo inclusão e desenvolvimento em comunidades rurais. Na Dinamarca, a Nature Energy engaja agricultores por meio de contratos de longo prazo, gerando renda estável e fortalecendo a economia local (ANGELIDAKI et al., 2018). No Brasil, a replicação desse modelo por meio de cooperativas rurais poderia beneficiar pequenos produtores, especialmente em estados como São Paulo e Paraná, onde a produção de cana e suínos é intensiva.

A geração de empregos e a valorização de resíduos, como a vinhaça, poderiam reduzir desigualdades regionais, alinhando-se ao ODS de redução da pobreza (Cardoso; Costa, 2020). Contudo, resistências culturais e a baixa conscientização sobre o biometano, conforme discutido demandam campanhas de conscientização para garantir a aceitação comunitária (ZANATTA et al., 2024).

A análise evidencia que a adaptação do modelo dinamarquês ao Brasil tem o potencial de reposicionar o país como líder em bioenergia, desde que os impactos ambientais, econômicos e sociais sejam gerenciados de forma integrada. A citação de Lemos et al. (2024) reforça a necessidade de um mercado estruturado para maximizar esses benefícios, mas o sucesso dependerá de políticas públicas que combinem incentivos financeiros, transferência tecnológica e engajamento comunitário.

A experiência da Nature Energy sugere que a colaboração intersetorial é essencial, mas no Brasil, onde a infraestrutura e a conscientização ainda são limitadas, a implementação deve ser incremental, começando com projetos piloto em regiões estratégicas (NASCIMENTO et al., 2019). Conclui-se que, embora os desafios sejam significativos, os impactos potenciais justificam um esforço coordenado para transformar o biometano em um pilar da transição energética brasileira.

7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Esta dissertação analisou as oportunidades e desafios para a geração de biogás e biometano no Brasil, utilizando o modelo dinamarquês, exemplificado pela Nature Energy, como referência para inspirar inovações sustentáveis, cumprindo o objetivo geral delineado neste estudo. Utilizando o método de Estudo de Caso, a pesquisa coletou dados por meio de análise documental (relatórios técnicos, políticas públicas e literatura científica) e entrevistas semiestruturadas com profissionais do setor dinamarquês, revelando como fatores políticos, econômicos, socioculturais, tecnológicos, ecológicos e legais moldam o segmento em ambos os contextos, estruturados pela aplicação da análise PESTEL.

Os resultados atendem aos objetivos específicos ao identificar sistematicamente as oportunidades e desafios para o desenvolvimento do setor de biometano em ambos os contextos, avaliar os impactos potenciais da adaptação do modelo dinamarquês ao Brasil, e propor caminhos para transformar o vasto potencial brasileiro – estimado em cerca de 84,6 bilhões de Nm³/ano de biogás segundo Lemos et al. (2024) – em uma realidade energética sustentável. Esta conclusão sintetiza os achados principais, destaca as contribuições da pesquisa, apresenta recomendações estratégicas, reconhece as limitações do estudo e projeta perspectivas para investigações futuras.

7.1. Síntese dos resultados

A análise PESTEL revelou contrastes marcantes entre Dinamarca e Brasil quanto aos desafios e oportunidades para o desenvolvimento do setor de biometano. Na Dinamarca, observam-se políticas públicas robustas desde a década de 1970, como tarifas de incentivo e metas ambiciosas de energia renovável, que criaram um ambiente institucional favorável ao desenvolvimento do setor. Tecnologias avançadas, especialmente em co-digestão de resíduos e purificação por membranas, permitiram à Nature Energy alcançar produção de 181 milhões de Nm³/ano de biogás, processando 4,4 milhões de toneladas de biomassa conforme Nature Energy (2022), reduzindo aproximadamente 500.000 toneladas de CO₂ anualmente. A integração à infraestrutura de gás natural existente e parcerias estruturadas com agricultores consolidaram um modelo de economia circular que transforma resíduos em recursos energéticos e biofertilizantes.

No Brasil, a abundância de biomassa – com potencial estimado em 84,6 bilhões de Nm³/ano – representa uma oportunidade extraordinária ainda subutilizada. Dados da ANP (2025) evidenciam que das 17 plantas autorizadas com capacidade de 747 mil Nm³/dia, apenas 226 mil Nm³/dia foram efetivamente produzidos em 2024, representando cerca de 0,3% do potencial teórico.

Os principais desafios identificados incluem: fragmentação normativa e ausência de incentivos fiscais específicos para biometano, apesar do avanço representado pelo RenovaBio; altos custos iniciais de implementação de tecnologias de purificação; ausência de infraestrutura de distribuição de gás natural em grande parte do território nacional; baixa conscientização pública sobre benefícios ambientais e econômicos do biometano; e resistência cultural à gestão integrada de resíduos. As entrevistas com profissionais dinamarqueses (E1, E2 e E3) reforçaram que a superação desses desafios requer não apenas inovação tecnológica, mas também coordenação intersetorial, segurança jurídica para contratos de longo prazo e engajamento comunitário.

As oportunidades brasileiras são significativas e incluem: vasto potencial de resíduos agroindustriais, especialmente vinhaça da produção de etanol e dejetos da suinocultura; possibilidade de integração com o setor sucroenergético já consolidado; capacidade de gerar empregos e renda em comunidades rurais através de cooperativas; alinhamento com Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS 7, 12 e 13) estabelecidos pela ONU (2015); e potencial de descarbonização do transporte pesado aproveitando infraestrutura de GNV existente em algumas regiões.

A comparação sistemática entre os dois contextos demonstrou que elementos do modelo dinamarquês — particularmente parcerias agrícolas, tecnologias modulares adaptáveis e mecanismos de certificação ambiental — são transferíveis ao Brasil mediante adaptações que considerem as especificidades regionais, institucionais e culturais do país.

7.2. Contribuições da pesquisa

Do ponto de vista teórico, este estudo contribui para a literatura sobre bioenergia ao aplicar a análise PESTEL de forma sistemática e multidimensional ao setor de biometano, preenchendo lacuna identificada na revisão da literatura quanto à ausência de estudos comparativos estruturados entre modelos consolidados e mercados emergentes.

A integração de dados secundários (50 artigos científicos, relatórios institucionais) com dados primários (três entrevistas com perfis estratégico, técnico e regulatório), oferece uma abordagem metodológica robusta que combina rigor analítico com *insights* práticos não disponíveis exclusivamente na literatura acadêmica. O framework PESTEL demonstrou-se adequado para identificar não apenas os fatores que influenciam o setor, mas também as interrelações entre dimensões políticas, econômicas, tecnológicas, sociais, ecológicas/ambientais e legais que determinam o sucesso ou fracasso de iniciativas em diferentes contextos nacionais.

Do ponto de vista prático, as contribuições desta pesquisa oferecem subsídios concretos para formuladores de políticas públicas, empresas do segmento de bioenergias, organizações de fomento e comunidades rurais. A identificação de elementos transferíveis do modelo dinamarquês — como contratos de longo prazo com agricultores (15-20 anos atrelados à inflação), *hubs* regionais de biometano em áreas de concentração de biomassa, e mecanismos de mercado como Certificados de Gás Verde (GoO) — fornece um roteiro estratégico adaptável às condições brasileiras.

As recomendações apresentadas neste estudo, fundamentadas em evidências empíricas e na experiência dinamarquesa, podem acelerar a transição energética brasileira ao transformar passivos ambientais (resíduos agroindustriais) em ativos estratégicos (energia renovável e biofertilizantes), promovendo simultaneamente desenvolvimento socioeconômico e sustentabilidade ambiental.

7.3. Impactos potenciais da adaptação do modelo dinamarquês ao Brasil

Os impactos potenciais da adaptação do modelo dinamarquês ao contexto brasileiro são transformadores em múltiplas dimensões. Ambientalmente, a expansão da produção de biometano pode contribuir significativamente para a mitigação de gases de efeito estufa ao capturar metano que seria liberado na atmosfera pela decomposição de resíduos orgânicos, substituir combustíveis fósseis no transporte pesado e na geração de energia, e melhorar a gestão de resíduos agroindustriais como a vinhaça, que atualmente representa um desafio ambiental segundo Tonial (2023). A valorização de resíduos através da produção de biometano e biofertilizantes promove princípios de economia circular, transformando passivos ambientais em recursos econômicos.

Economicamente, o desenvolvimento de cadeias de valor integradas no setor de biometano possui potencial para gerar empregos diretos e indiretos, especialmente em regiões rurais onde oportunidades são mais escassas, diversificar a matriz energética brasileira reduzindo a dependência de combustíveis fósseis importados, estabelecer mercados para biofertilizantes que podem substituir fertilizantes químicos na agricultura, e atrair investimentos em tecnologias verdes e infraestrutura energética. A comercialização de Créditos de Descarbonização (CBIOS) através do RenovaBio, pode oferecer receita adicional aos produtores, viabilizando economicamente projetos que enfrentam barreiras de custo inicial.

Socialmente, a integração de pequenos e médios produtores rurais em cadeias de fornecimento de biomassa, através de cooperativas e arranjos colaborativos inspirados no modelo dinamarquês, pode gerar renda complementar para a agricultura familiar, promover inclusão socioeconômica em comunidades rurais, e fortalecer o desenvolvimento local através de parcerias estruturadas. Esses impactos alinham-se diretamente aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável estabelecidos pela ONU (2015), especialmente ODS 7 (Energia Limpa e Acessível), ODS 12 (Consumo e Produção Responsáveis) e ODS 13 (Ação contra a Mudança Global do Clima), posicionando o Brasil como potencial líder global em bioenergia sustentável.

7.4. Recomendações estratégicas para o desenvolvimento do setor brasileiro de biometano

Com base nos achados desta pesquisa e nas lições extraídas do modelo dinamarquês, recomendam-se as seguintes estratégias para acelerar o desenvolvimento sustentável do setor de biometano no Brasil:

Dimensão Política e Regulatória: Estabelecer um marco regulatório específico para o biometano que complemente o RenovaBio, definindo metas quantitativas de produção, mecanismos de certificação de qualidade e incentivos fiscais direcionados. Inspirado nos Certificados de Gás Verde (GoO) dinamarqueses, recomenda-se desenvolver instrumentos de mercado que permitam negociar o atributo ambiental do biometano separadamente da molécula física, criando subsídios de mercado sem dependência exclusiva de recursos públicos. Assegurar segurança jurídica para contratos de longo prazo (15-20 anos) entre produtores de biomassa e plantas de biometano, viabilizando o financiamento dos projetos conforme destacado pelo entrevistado E3.

Dimensões Econômica e Tecnológica: Estabelecer programas de financiamento específicos para tecnologias de purificação (*upgrading*) de biogás, com linhas de crédito subsidiadas e prazos de carência adequados aos ciclos de retorno de investimento. Priorizar o desenvolvimento de "hubs regionais" de biometano em áreas de alta concentração de

biomassa, como o interior de São Paulo (setor sucroenergético) e oeste do Paraná (suinocultura), conforme sugerido pelo entrevistado E2. Investir em plantas modulares e capazes de processar diferentes tipos de resíduos (co-digestão), adaptando tecnologias dinamarquesas às condições tropicais e à diversidade de biomassa brasileira.

Dimensões Social e Cultural: Implementar campanhas educativas direcionadas a agricultores, municípios e população em geral sobre benefícios ambientais, econômicos e sociais do biometano, combatendo mitos relacionados a odores, riscos ambientais e viabilidade técnica. Estruturar programas de capacitação técnica em parceria com universidades e centros de pesquisa (ex.: Embrapa Agroenergia) para formar profissionais especializados em operação de plantas, gestão de biomassa e purificação de biogás. Fomentar a criação de cooperativas e associações de agricultores para fornecimento estruturado de biomassa, inspiradas no modelo dinamarquês de parcerias de longo prazo com contratos que garantem benefícios mútuos e segurança de suprimento.

Dimensão Ecológica/Ambiental: Estabelecer protocolos rigorosos de monitoramento de emissões fugitivas de metano ao longo de toda a cadeia produtiva, conforme destacado por Bakkaloglu et al. (2022), assegurando que os ganhos ambientais do biometano sejam efetivamente realizados. Desenvolver padrões de certificação para biofertilizantes (digestato), que permitam sua comercialização como produto de valor agregado, fechando o ciclo de economia circular e gerando receita adicional conforme praticado na Dinamarca. Priorizar projetos piloto em regiões com histórico de problemas críticos de gestão de resíduos, demonstrando viabilidade técnica e econômica para estimular replicação em outras localidades.

Implementação Incremental: Recomenda-se uma abordagem de implementação gradual, iniciando com projetos-piloto em polos agroindustriais estratégicos (ex.: usinas sucroenergéticas em São Paulo, cooperativas de suinocultores em Santa Catarina), que possam servir como demonstração de viabilidade técnica e econômica. Esses projetos permitirão ajustar tecnologias e modelos de negócio às especificidades brasileiras antes de uma expansão nacional, seguindo o princípio de "aprender fazendo" que caracterizou o desenvolvimento do setor dinamarquês desde a década de 1970.

7.5. Limitações da pesquisa

Cabe reconhecer as limitações inerentes a esta investigação, que podem influenciar a interpretação dos resultados e a generalização das conclusões. Uma das principais limitações refere-se à dependência de dados secundários para caracterizar os dois contextos analisados. Embora a Revisão da Literatura tenha analisado 50 artigos selecionados a partir de 400 identificados, a disponibilidade e atualidade das informações variam entre Dinamarca e Brasil.

Enquanto relatórios da Agência Dinamarquesa de Energia (2024) e Nature Energy (2022), oferecem dados detalhados e atualizados sobre produção e tecnologias, as informações sobre o Brasil baseiam-se frequentemente em projeções de potencial teórico que podem não refletir plenamente a realidade operacional, dada a escassez de dados primários consistentes sobre plantas em operação comercial. Essa assimetria informacional pode limitar a profundidade da comparação em alguns aspectos técnicos e econômicos.

Outra limitação está associada ao foco em um Estudo de Caso único. Apesar de a Nature Energy ser representativa do sucesso dinamarquês, a análise baseada em uma única empresa restringe a generalização para o setor como um todo. Skovsgaard e Jacobsen (2017), destacam a diversidade de políticas e práticas no contexto dinamarquês, sugerindo que outros modelos empresariais ou arranjos organizacionais poderiam revelar nuances adicionais sobre fatores de sucesso.

Além disso, embora tenham sido realizadas três entrevistas semiestruturadas com profissionais de perfis estratégico, técnico e regulatório, todas as perspectivas foram obtidas do contexto dinamarquês, não capturando diretamente a visão de operadores ou gestores brasileiros sobre especificidades locais, barreiras práticas e adaptações necessárias. A triangulação das três perspectivas enriqueceu substancialmente a análise qualitativa, mas a ausência de entrevistas com profissionais brasileiros do setor representa uma lacuna que investigações futuras poderiam preencher.

A aplicação da análise PESTEL, embora metodologicamente robusta, também apresenta limitações inerentes ao seu caráter qualitativo. A matriz PESTEL depende da interpretação dos dados coletados, o que pode introduzir viés na priorização de determinados fatores sobre outros. Além disso, projeções sobre o futuro do biometano envolvem incertezas relacionadas a mudanças políticas, econômicas e tecnológicas que podem alterar significativamente os fatores analisados, conforme destacado por Brémond et al. (2021) em suas projeções até 2030 para o contexto europeu.

7.6. Sugestões para trabalhos futuros

Para investigações futuras, recomenda-se a expansão do escopo desta pesquisa em múltiplas direções que podem complementar e aprofundar os achados aqui apresentados. Uma primeira direção envolve a realização de estudos de caso múltiplos, incluindo outras empresas dinamarquesas além da Nature Energy e comparando com modelos de outros países europeus bem-sucedidos, como a Alemanha e a Suécia, para identificar variações em estratégias tecnológicas, arranjos organizacionais e políticas de apoio que possam oferecer lições adicionais ao contexto brasileiro.

Uma segunda direção sugere a condução de entrevistas com profissionais brasileiros do setor — incluindo operadores de plantas existentes, gestores de usinas sucroenergéticas,

cooperativas agrícolas e formuladores de políticas públicas — para capturar percepções locais sobre barreiras específicas, adaptações tecnológicas necessárias e oportunidades inexploradas. Essa triangulação entre perspectivas dinamarquesas e brasileiras enriqueceria a análise comparativa e fundamentaria recomendações ainda mais contextualizadas às realidades regionais do Brasil.

Uma terceira direção envolve o desenvolvimento de um Índice de Viabilidade para Empreendimentos em Biometano (IVEB), baseado nos fatores PESTEL identificados nesta pesquisa. Este índice permitiria classificar regiões brasileiras quanto ao seu potencial de implementação considerando dimensões políticas (existência de incentivos locais), econômicas (disponibilidade de biomassa, custos de infraestrutura), sociais (aceitação comunitária, presença de cooperativas), tecnológicas (acesso a expertise e equipamentos), ambientais (urgência de gestão de resíduos), e legais (clareza regulatória estadual). Tal ferramenta orientaria decisões de investimento público e privado, priorizando regiões com maior prontidão para desenvolvimento do setor.

Uma quarta direção recomenda estudos quantitativos complementares, incluindo modelagem econômico-financeira de diferentes configurações de plantas de biometano (pequeno, médio e grande portes; diferentes tipos de biomassa; com ou sem integração à rede de gás), análises de ciclo de vida (ACV) comparando biometano com outras alternativas renováveis no contexto brasileiro, e simulações de cenários políticos e econômicos para projetar trajetórias de desenvolvimento do setor sob diferentes condições regulatórias e de mercado.

Por fim, sugere-se a investigação de aspectos socioculturais que influenciam a aceitação do biometano por comunidades locais, agricultores e consumidores finais no Brasil, utilizando metodologias qualitativas como grupos focais e etnografia organizacional. Compreender barreiras culturais e desenvolver estratégias de comunicação e engajamento comunitário baseadas em evidências empíricas é fundamental para o sucesso de projetos de biometano, conforme evidenciado pela experiência dinamarquesa de construção de consenso social ao longo de décadas.

7.7. Considerações finais

O biometano representa uma oportunidade estratégica para o Brasil redefinir sua matriz energética, unindo ciência, política e sociedade em prol de um futuro mais sustentável. Este estudo demonstrou que a adaptação do modelo dinamarquês ao contexto brasileiro é não apenas viável, mas necessária para transformar o vasto potencial de 84,6 bilhões de Nm³/ano em realidade energética que gere benefícios ambientais, econômicos e sociais. A experiência dinamarquesa revela que o sucesso no setor de biometano não decorre exclusivamente de avanços tecnológicos, mas fundamentalmente de uma coordenação eficaz

entre políticas públicas robustas, incentivos econômicos adequados, engajamento comunitário estruturado e compromisso de longo prazo com a sustentabilidade.

O caminho para o Brasil consolidar-se como líder global em bioenergia passa pela superação dos desafios identificados — fragmentação regulatória, altos custos iniciais, ausência de infraestrutura e baixa conscientização — através de estratégias incrementais que considerem as especificidades regionais, institucionais e culturais do país.

As recomendações apresentadas neste estudo oferecem um roteiro inicial baseado em evidências empíricas e na experiência internacional bem-sucedida, convidando formuladores de políticas, empresas, pesquisadores e comunidade a traduzirem esse conhecimento em ações concretas que transformem resíduos em recursos, desafios em oportunidades, e potencial em progresso sustentável.

8. REFERÊNCIAS

- ABEGÁS. SP define percentual mínimo de biometano na rede de gás. São Paulo: Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Gás Canalizado, 2018. Disponível em: <https://www.abegas.org.br/site/2018/11/01/sp-define-percentual-minimo-de-biometano-na-rede-de-gas/>. Acesso em: 06 abr. 2025.
- ADNAN, A. et al. Technologies for biogas upgrading to biomethane: a review. *Bioengineering*, v. 6, n. 4, 2019. DOI: 10.3390/bioengineering6040092.
- AGÊNCIA DINAMARQUESA DE ENERGIA. *Energistyrelsens Biogasstatistik 2019*. Copenhagen: Agência Dinamarquesa de Energia, 2020.
- AGUILAR, F. J. *Scanning the Business Environment*. New York: Macmillan, 1967.
- AMOO, O. M. et al. The impact of process variables on the quantity and quality of biogas generated from anaerobic digestion of food waste and rumen contents. *Industrial and Domestic Waste Management*, v. 3, n. 1, 2023. DOI: 10.53623/idwm.v3i1.196.
- ANDRIUŠKEVIČIUS, A.; ŠTREIMIKIENĖ, D. Developments and trends of mergers and acquisitions in the energy industry. *Energies*, v. 14, n. 8, 2021. DOI: 10.3390/en14082158.
- ANGELIDAKI, I. et al. Biogas upgrading and utilization: current status and perspectives. *Biotechnology Advances*, v. 36, n. 2, p. 452-466, 2018. DOI: 10.1016/j.biotechadv.2018.01.011.
- ARYAL, N.; KVIST, T. Alternative of biogas injection into the Danish gas grid system—a study from demand perspective. *ChemEngineering*, v. 2, n. 3, 2018. DOI: 10.3390/chemengineering2030043.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE BIOGÁS E DE BIOMETANO. *O que é biogás e biometano?* 2021. Disponível em: <https://www.abiogas.org.br/biogas-e-biometano/>. Acesso em: 22 out. 2021.
- AWORANTI, O. A. et al. Enhancing and upgrading biogas and biomethane production in anaerobic digestion: a comprehensive review. *Frontiers in Energy Research*, v. 11, 2023. DOI: 10.3389/fenrg.2023.1170133.
- BAENA-MORENO, F.; MALICO, I.; MARQUES, I. Promoting sustainability: wastewater treatment plants as a source of biomethane in regions far from a high-pressure grid. A real Portuguese case study. *Sustainability*, v. 13, n. 16, 2021. DOI: 10.3390/su13168933.

BAKKALOGLU, S. et al. Quantification of methane emissions from UK biogas plants. *Waste Management*, v. 124, p. 1-12, 2021. DOI: 10.1016/j.wasman.2021.11.032.

BAKKALOGLU, S.; COOPER, J.; HAWKES, A. Methane emissions along biomethane and biogas supply chains are underestimated. *One Earth*, v. 5, n. 6, p. 724-736, 2022. DOI: 10.1016/j.oneear.2022.05.012.

BAUER, F. et al. Biogas upgrading – technology overview, comparison and perspectives for the future. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, v. 7, n. 5, p. 499-511, 2013. DOI: 10.1002/bbb.1423.

BENTIVOGLIO, D.; CHIARALUCE, G.; FINCO, A. Economic assessment for vegetable waste valorization through the biogas-biomethane chain in Italy with a circular economy approach. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, v. 6, 2022. DOI: 10.3389/fsufs.2022.1035357.

BRÉMOND, U. et al. A vision of European biogas sector development towards 2030: trends and challenges. *Journal of Cleaner Production*, v. 287, 2021. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.125065.

CAPOBIANCO, N. et al. Toward a sustainable decommissioning of offshore platforms in the oil and gas industry: a PESTLE analysis. *Sustainability*, v. 13, n. 11, 2021. DOI: 10.3390/su13116266.

CAPOSCIUTTI, G.; BACCIOLI, A.; FERRARI, L.; DESIDERI, U. Biogas from anaerobic digestion: power generation or biomethane production? *Energies*, v. 13, n. 3, 2020. DOI: 10.3390/en13030743.

CARDOSO, M.; COSTA, H. Renovabio, uma análise sobre o programa e sua influência no desenvolvimento do mercado do biometano. *Revista Brasileira de Energia*, v. 26, n. 3, 2020. DOI: 10.47168/rbe.v26i3.573.

ČERYOVÁ, D. et al. Evaluation of development and efficiency of renewable energy sources in Nordic countries of the European Union. In: INTERNATIONAL SCIENTIFIC CONFERENCE, 20., 2021. Proceedings... [S.l.: s.n.], 2021. DOI: 10.22616/erdev.2021.20.tf337.

CIBIOGÁS. Panorama do biogás no Brasil 2023. Florianópolis: Epagri, 2024. Disponível em: <<https://www.epagri.sc.gov.br/index.php/2024/04/29/sul-do-brasil-conta-com-636-plantas-de-biogas-mais-da-metade-de-origem-na-agropecuaria/>>. Acesso em: 06 abr. 2025.

COSTA, Leonardo et al. Biogás e biometano no Brasil: panorama e perspectivas. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, Curitiba, v. 13, n. 3, p. 468-482, 2024. Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/made/article/download/88929/52191>. Acesso em: 14 jul. 2025.

CUCCHIELLA, F.; D'ADAMO, I.; GASTALDI, M. Sustainable Italian cities: the added value of biomethane from organic waste. *Applied Sciences*, v. 9, n. 11, 2019. DOI: 10.3390/app9112221.

DANISH ENERGY AGENCY. *Biogas in Denmark*. Copenhagen: Danish Energy Agency, 2024. Disponível em: <https://ens.dk/en/our-responsibilities/bioenergy/biogas-denmark>. Acesso em: 06 abr. 2025.

DALE, B. E. et al. The potential for expanding sustainable biogas production and some possible impacts in countries. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, v. 14, n. 6, p. 1335-1347, 2020. DOI: 10.1002/bbb.2134.

DAMSØ, T.; KJÆR, T.; CHRISTENSEN, T. Local climate action plans in climate change mitigation – examining the case of Denmark. *Energy Policy*, v. 89, p. 74-83, 2016. DOI: 10.1016/j.enpol.2015.11.013.

DIEGO, D.; MÜHL, L.; OLIVEIRA, F. Features of anaerobic digestion plants in the Brazilian agricultural sector. *Cleaner and Circular Bioeconomy*, v. 1, 2022. DOI: 10.1016/j.clcb.2021.100001.

ENERGINET. **DANISH BIOMETHANE EXPERIENCES**. Setembro de 2022. Disponível em: <https://en.energinet.dk/media/slybe41z/danish-biomethane-experiences.pdf>. Acesso em: 14 jul. 2025.

EPE. *Panorama de biometano*. Rio de Janeiro: Empresa de Pesquisa Energética, 2024. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-781/Panorama%20de%20Biometano.pdf>. Acesso em: 8 set. 2025. ESTADÃO. São Paulo recebe novos investimentos para desenvolver mercado de gás e biometano. São Paulo: Estadão, 2024. Disponível em: <https://www.estadao.com.br/economia/sao-paulo-recebe-novos-investimentos-para-desenvolver-mercado-de-gas-e-biometano>. Acesso em: 06 abr. 2025

FEILBERG, A. et al. Odorant emissions from intensive pig production measured by online proton-transfer-reaction mass spectrometry. *Environmental Science & Technology*, v. 44, n. 15, p. 5894-5900, 2010. DOI: 10.1021/es100483s.

FRANCO, C.; BOJESSEN, M.; HOUGAARD, J.; NIELSEN, K. A fuzzy approach to a multiple criteria and geographical information system for decision support on suitable locations for biogas plants. *Applied Energy*, v. 140, p. 304-315, 2015. DOI: 10.1016/j.apenergy.2014.11.060.

GARUTI, M. et al. Evaluation of triticale anaerobic digestion in a double cropping system: relation between biomass yield, chemical composition, and biomethane production. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, v. 16, n. 6, p. 1599-1612, 2022. DOI: 10.1002/bbb.2393.

GEF BIOGÁS BRASIL. Projeto GEF Biogás Brasil: inovação e sustentabilidade para o setor de biogás e biometano. Brasília, DF: MCTI/UNIDO, 2023. Disponível em: <https://www.gefbiogas.org.br>. Acesso em: 22 jan. 2026..

GOLUB, G. et al. Determining impact of difference in price of liquid manure and degestate on production costs of biomethane and electricity. In: INTERNATIONAL SCIENTIFIC CONFERENCE, 20., 2021. Proceedings... [S.l.: s.n.], 2021. DOI: 10.22616/erdev.2021.20.tf067.

GUSTAFSSON, M.; ANDERBERG, S.; SVENSSON, N.; ANDERSSON, L. Climate performance of liquefied biomethane with carbon dioxide utilization or storage. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2023. DOI: 10.1016/j.rser.2023.114239.

GYASI, P. et al. Impact of different mixing ratios on biomethanation of cattle blood and rumen content. *International Journal of Research and Scientific Innovation*, v. 8, n. 4, p. 61-66, 2021. DOI: 10.51244/ijrsi.2021.8404.

HAVRYSH, V. et al. Commercial biogas plants: lessons for Ukraine. *Energies*, v. 13, n. 10, 2020. DOI: 10.3390/en13102668.

HUANG, Y. et al. Fast startup of semi-pilot-scale anaerobic digestion of food waste acid hydrolysate for biogas production. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, v. 65, n. 50, p. 10957-10964, 2017. DOI: 10.1021/acs.jafc.7b04005.

IDR-PARANÁ. Chamada pública biogás: Programa Paraná Energia Rural Renovável – RENOVA PR. Florianópolis: Portal Energia e Biogás, 2021. Disponível em: <https://energiaebiogas.com.br/chamada-publica-biogas-programa-renovapr-parana/>. Acesso em: 06 abr. 2025.

IGLESIAS, R. et al. Biogas from anaerobic digestion as an energy vector: current upgrading development. *Energies*, v. 14, n. 10, 2021. DOI: 10.3390/en14102742.

JAFARI-SEJAHROOD, A. et al. Limiting factors for biogas production from cow manure: energo-environmental approach. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, v. 13, n. 1, p. 954-966, 2019. DOI: 10.1080/19942060.2019.1654411.

KALITA, S. et al. Energy performance of compressed biogas production from co-digestion of *Salix* and dairy manure: factoring differences between *Salix* varieties. *Research Square*, 2023. DOI: 10.21203/rs.3.rs-3128612/v1.

KĀRKLĪŅA, K. et al. Social life cycle assessment of biomethane production and distribution in Latvia. *Environment Technology Resources Proceedings of the International Scientific and Practical Conference*, v. 2, p. 128, 2015. DOI: 10.17770/etr2015vol2.628.

LABIANCA, M.; FACCILONGO, N.; MONARCA, U.; LOMBARDI, M. A location model for the agro-biomethane plants in supporting the REPowerEU energy policy program. *Sustainability*, v. 16, n. 1, 2023. DOI: 10.3390/su16010215.

LARSEN, S.; BENTSEN, N.; STUPAK, I. Implementation of voluntary verification of sustainability for solid biomass—a case study from Denmark. *Energy, Sustainability and Society*, v. 9, n. 1, 2019. DOI: 10.1186/s13705-019-0209-0.

LAWSON, N.; ALVARADO-MORALES, M.; TSAPEKOS, P.; ANGELIDAKI, I. Techno-economic assessment of biological biogas upgrading based on Danish biogas plants. *Energies*, v. 14, n. 24, 2021. DOI: 10.3390/en14248252.

LEMOS, G.; CARDOSO, M.; COSTA, H. Biogás e biometano no Brasil: panorama e perspectivas. *Desenvolvimento e Meio Ambiente*, v. 63, 2024. DOI: 10.5380/dma.v63i0.88929.

LI, Y. et al. Influence of temperature on anaerobic co-digestion of dairy manure and edible mushroom cultivation waste. In: *INTERNATIONAL CONFERENCE ON FRONTIERS OF ENVIRONMENT, ENERGY AND BIOSCIENCE*, 2016. *Proceedings...* [S.l.: s.n.], 2016. DOI: 10.2991/ifeesd-16.2016.180.

LIU, W.; LUND, H.; MATHIESEN, B.; ZHANG, X. Potential of renewable energy systems in China. *Applied Energy*, v. 88, n. 2, p. 518-525, 2011. DOI: 10.1016/j.apenergy.2010.07.014.

LOPES, L. S. et al. Energy potential of biogas and sludge from UASB reactors in the state of Paraná, Brazil. *Ambiente e Água - An Interdisciplinary Journal of Applied Science*, v. 15, n. 1, 2020. DOI: 10.4136/ambi-agua.2398.

MARCUCCI, A. Biogas overview: global and Brazilian perspectives with emphasis on Paraná state. *Sustainability*, v. 17, n. 1, 2025. DOI: 10.3390/su17010321.

MARK, B.; NIELSEN, R.; LYBÆK, T.; KJÆR, T. Successfully navigating the project lifecycle for deployment of centralized biogas projects—the case of Solrød Biogas. *Energies*, v. 15, n. 16, 2022. DOI: 10.3390/en15165879.

MEISTERL, K. et al. Circular bioeconomy in the metropolitan area of Barcelona: policy recommendations to optimize biowaste management. *Sustainability*, v. 16, n. 3, 2024. DOI: 10.3390/su16031208.

MEHO, Lokman I. E-Mail Interviewing in Qualitative Research: A Methodological Discussion. *Journal of the American Society for Information Science and Technology*, v. 57, n. 10, p. 1284–1295, 2006

MIGNOGNA, D. et al. Production of biogas and biomethane as renewable energy sources: a review. *Applied Sciences*, v. 13, n. 18, 2023. DOI: 10.3390/app131810219.

MILBRANDT, A. et al. Biogas and hydrogen systems market assessment. [S.l.]: National Renewable Energy Laboratory, 2016. DOI: 10.2172/1246958.

NARAYANAN, R.; NARAYAN, V. Recent developments in biogas manufacture and biogas utilization: a review. *European Journal of Sustainable Development Research*, v. 4, n. 4, 2020. DOI: 10.29333/ejosdr/8366.

NASCIMENTO, J.; LEMOS, G.; COSTA, H.; SANTOS, A. Biogás no Brasil: barreiras e oportunidades para o aproveitamento energético de resíduos agroindustriais. *Revista Brasileira de Energias Renováveis*, v. 8, n. 2, p. 145-162, 2019. DOI: 10.5380/rber.v8i2.65234.

NASCIMENTO, M. et al. Estado da arte dos aterros de resíduos sólidos urbanos que aproveitam o biogás para geração de energia elétrica e biometano no Brasil. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 24, n. 1, p. 143-155, 2019. DOI: 10.1590/s1413-41522019171125.

NAUFALDI, J.; SUNITIYOSO, Y. Scenario planning approach of coal market sales on PT ABCoal towards energy transitions era. *European Journal of Business Management and Research*, v. 9, n. 1, 2024. DOI: 10.24018/ejbmr.2024.9.1.2181.

NONE, M. Biomethanisation: biogas production technologies. In: *BIOGAS HANDBOOK*, 2022. [S.l.: s.n.], p. 33-63. DOI: 10.1002/9781119785842.ch2.

O'BRIEN, B. C. et al. Standards for reporting qualitative research: a synthesis of recommendations. *Academic Medicine*, v. 89, n. 9, p. 1245-1251, 2014. DOI: 10.1097/ACM.0000000000000388.

PAGE, M. J. et al. The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. **Systematic Reviews**, v. 10, n. 89, 2021. DOI: 10.1186/s13643-021-01626-4.

PAOLINI, V. et al. Environmental impact of biogas: a short review of current knowledge. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, v. 53, n. 10, p. 899-906, 2018. DOI: 10.1080/10934529.2018.1459076.

PAPIRIO, S.; MATASSA, S.; PIROZZI, F.; ESPOSITO, G. Anaerobic co-digestion of cheese whey and industrial hemp residues opens new perspectives for the valorization of agri-food waste. *Energies*, v. 13, n. 11, 2020. DOI: 10.3390/en13112820.

PARK, H. B. et al. Maximizing the right stuff: the trade-off between membrane permeability and selectivity. *Science*, v. 356, n. 6343, 2017. DOI: 10.1126/science.aab0530.

PATRIZIO, P. et al. Biomethane as transport fuel – a comparison with other biogas utilization pathways in northern Italy. *Applied Energy*, v. 157, p. 25-34, 2015. DOI: 10.1016/j.apenergy.2015.07.074.

PAWLITA-POSMYK, M.; WZOREK, M. Biogas production from the perspective of sustainable development. *Economic and Environmental Studies*, v. 18, n. 3, p. 1043-1057, 2020. DOI: 10.25167/ees.2018.47.1.

PETRYSHYN, I.; SEREDIUK, D.; BAS, O.; MANULYAK, R. Aspects of the introduction of alternative gas fuels and their influence on the quality of natural gas. *Ukrainian Metrological Journal*, n. 2, p. 52-57, 2022. DOI: 10.24027/2306-7039.2.2022.263892.

PROSKURINA, S.; MENDOZA-MARTINEZ, C. Expectations for bioenergy considering carbon neutrality targets in the EU. *Energies*, v. 16, n. 14, 2023. DOI: 10.3390/en16145314.

PÄÄKKÖNEN, A. et al. The potential of biomethane in replacing fossil fuels in heavy transport—a case study on Finland. *Sustainability*, v. 11, n. 17, 2019. DOI: 10.3390/su11174750.

RAÍZEN. Parque de Bioenergia Bonfim. São Paulo: Raízen, 2020. Disponível em: <https://www.raizen.com.br/sala-de-imprensa/raizen-inaugura-planta-de-biogas-e-consolida-portfolio-de-energias-renovaveis>. Acesso em: 06 abr. 2025.

RETHLEFSEN, M. L. et al. PRISMA-S: an extension to the PRISMA Statement for Reporting Literature Searches in Systematic Reviews. *Systematic Reviews*, v. 10, n. 39, 2021. DOI: 10.1186/s13643-020-01542-z.

RIDELENSKY, M.; SANTOS, A. Panorama do lixo na Baixada Santista e sua utilização na geração de energia renovável. *Research綜*

ROGOWSKA, D.; PAJDA, M. Applications of sustainable biogas. *Nafta-Gaz*, v. 76, n. 10, p. 750-756, 2020. DOI: 10.18668/ng.2020.10.11.

SAMOSIR, J. et al. Isolation and identification of biogas-producing methanogenic bacteria from cow manure. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON BIOLOGICAL SCIENCES AND BIOTECHNOLOGY, 2022. Proceedings... [S.l.: s.n.], 2022. DOI: 10.2991/978-94-6463-062-6_44.

SANTOS, J. et al. Metodologias de amostragem de siloxanos em biogás e biometano: análise crítica e aplicabilidade no cenário brasileiro. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 27, n. 6, p. 1059-1065, 2022. DOI: 10.1590/s1413-415220210174.

SANTOS, V.; FREITAS, G.; AMORIM, M. Otimização da digestão anaeróbia de resíduos agrícolas: prospecção científica de alcalinizantes alternativos. *Journal of Environmental Analysis and Progress*, v. 9, n. 4, p. 253-264, 2024. DOI: 10.24221/jeap.9.4.2024.6228.253-264.

SCHMID, C.; HORSCHIG, T.; PFEIFFER, A.; SZARKA, N.; THRÄN, D. Biiraqgas upgrading: a review of national biomethane strategies and support policies in selected countries. *Energies*, v. 12, n. 19, 2019. DOI: 10.3390/en12193803.

SHANMUGAM, K. et al. Social cost benefit analysis of operating compressed biomethane (CBM) transit buses in developing nations: a case study. *Sustainability*, v. 11, n. 15, 2019. DOI: 10.3390/su11154190.

SILVA DOS SANTOS, I. F.; VIEIRA, N. D. B.; DE NÓBREGA, L. G. B.; BARROS, R. M.; TIAGO FILHO, G. L. Assessment of potential biogas production from multiple organic wastes in Brazil: Impact on energy generation, use, and emissions abatement. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 131, p. 54-63, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.12.012>. Acesso em: 06 abr. 2025.

SKOVSGAARD, L.; JACOBSEN, H. Economies of scale in biogas production and the significance of flexible regulation. *Energy Policy*, v. 101, p. 77-89, 2017. DOI: 10.1016/j.enpol.2016.11.021.

SOARES, I. P.; SCHULTZ, E. L.; GAMBETTA, R.; GONÇALVES, S. B. Biogás e suas contribuições para os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável. Brasília: Embrapa Agroenergia, 2022.

SOVACOOOL, B.; BLYTH, P. Energy and environmental attitudes in the green state of Denmark: implications for energy democracy, low carbon transitions, and energy literacy. *Environmental Science & Policy*, v. 54, p. 304-315, 2015. DOI: 10.1016/j.envsci.2015.07.011.

SPOSÓB, A. A. et al. Ex-situ biological CO₂ methanation using trickle bed reactor: review and recent advances. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, v. 20, n. 4, p. 787-812, 2021. DOI: 10.1007/s11157-021-09589-7.

STAŠ, M. et al. Properties and analysis of gaseous alternative fuels II: fuels based on natural gas and biogas. *Paliva*, v. 14, n. 3, 2022. DOI: 10.35933/paliva.2022.03.05.

SULEWSKI, P.; IGNACIUK, W.; SZYMAŃSKA, M.; WAŚ, A. Development of the biomethane market in Europe. *Energies*, v. 16, n. 4, 2023. DOI: 10.3390/en16042001.

SNYDER, H. Literature review as a research methodology: An overview and guidelines. *Business Research*, v. 104, p. 333-339, 2019. DOI: 10.1016/j.jbusres.2019.07.039.

TOKARCHUK, D.; TOMLIAK, T. A review of waste management in the EU countries and the experience of its energy use. *Economy Finances Management: Topical Issues of Science and Practical Activity*, n. 2(64), p. 44-58, 2023. DOI: 10.37128/2411-4413-2023-2-3.

TONIAL, I. Assessment of biogas and syngas production from sugarcane vinasse: a sustainable alternative for the production of renewable fuels. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, v. 42, n. 6, 2023. DOI: 10.1002/ep.14294.

TONRANGLANG, P.; THERDYOTHIN, A.; PREECHAWUTTIPONG, I. The financial feasibility of compressed biomethane gas application in Thailand. *Energy, Sustainability and Society*, v. 12, n. 1, 2022. DOI: 10.1186/s13705-022-00339-3.

TRICCO, A. C. et al. PRISMA Extension for Scoping Reviews (PRISMA-ScR): Checklist and Explanation. *Annals of Internal Medicine*, v. 169, n. 7, p. 467-473, 2018. DOI: 10.7326/M18-0850.

UGWU, S.; ENWEREMADU, C. Biodegradability and kinetic studies on biomethane production from okra (*Abelmoschus esculentus*) waste. *South African Journal of Science*, v. 115, n. 7/8, 2019. DOI: 10.17159/sajs.2019/5595.

UPADHYAY, A. et al. Recent development in physical, chemical, biological and hybrid biogas upgradation techniques. *Sustainability*, v. 15, n. 1, 2022. DOI: 10.3390/su15010476.

UZODINMA, E. O. et al. Optimization of biogas fuel production from maize (*Zea mays*) bract waste: comparative study of biogas production from blending maize bract with biogenic wastes. *American Journal of Food and Nutrition*, v. 1, n. 1, p. 1-6, 2011. DOI: 10.5251/ajfn.2011.1.1.1.6.

YIN, ROBERT K. Estudo de caso: planejamento e métodos. Tradução de Cristhian Matheus Herrera. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2015.

YÜKSEL, İ. Developing a multi-criteria decision making model for PESTEL analysis. *International Journal of Business and Management*, v. 7, n. 24, p. 52-66, 2012.

YUSOF, N. et al. Optimization of methane gas production from co-digestion of food waste and poultry manure using artificial neural network and response surface methodology. *Journal of Agricultural Science*, v. 6, n. 7, 2014. DOI: 10.5539/jas.v6n7p27.

ZALENGERA, C. et al. Overview of the Malawi energy situation and a PESTLE analysis for sustainable development of renewable energy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 38, p. 335-347, 2014. DOI: 10.1016/j.rser.2014.05.050.

ZANATTA, H.; KANDA, W.; TONDERSKI, K. Biogas production in Brazil: barriers and strategies for overcoming them. Linköping: Linköping University Electronic Press, 2024. DOI: 10.3384/9789180758352.

ZHENG, Q.; LV, H.; ZHOU, W.; ZHANG, C. Research on multi-period hydrogen refueling station location model in Jiading district. *World Electric Vehicle Journal*, v. 12, n. 3, 2021. DOI: 10.3390/wevj12030146.

ZHOU, L.; LAI, C.; WU, M.; GUO, J. Simultaneous biogas upgrading and valuable chemical production using homoacetogens in a membrane biofilm reactor. *Environmental Science & Technology*, v. 58, n. 28, p. 12509-12519, 2024. DOI: 10.1021/acs.est.4c02021.

KARDEC, Allan. *O Evangelho Segundo o Espiritismo*. Tradução de Evandro Noleto Bezerra. 131. ed. Rio de Janeiro: Federação Espírita Brasileira, 2019.

LUIZ, André. *Apostilas da Vida*. 26. ed. Rio de Janeiro: Federação Espírita Brasileira, 2006. (Psicografado por Francisco Cândido Xavier).

TYLER, Bonnie. *Total Eclipse of the Heart*. Intérprete: Bonnie Tyler. Compositor: Jim Steinman. Álbum: *Faster Than the Speed of Night*. LP. New York: Columbia Records, 1983.

APÊNDICE A - ENTREVISTAS SEMIESTRUTURADAS COM PROFISSIONAIS DO SETOR DE BIOGÁS E BIOMETANO

A.1. INTRODUÇÃO

Este apêndice apresenta as transcrições de três entrevistas semiestruturadas realizadas com profissionais vinculados ao setor de biogás e biometano na Dinamarca, como parte do Estudo de Caso descrito no Capítulo 5 da dissertação. As entrevistas foram conduzidas entre outubro de 2024 e janeiro de 2026 e tiveram como objetivo coletar insights sobre o modelo dinamarquês de produção de biogás e biometano, incluindo aspectos tecnológicos, políticos, econômicos, sociais e ambientais, para embasar a análise PESTEL (Capítulo 6) e propor recomendações para o Brasil (Capítulo 7).

A escolha de três entrevistados com perfis profissionais distintos permitiu triangular perspectivas complementares: (1) visão estratégica e de comunicação com stakeholders, (2) expertise técnico-operacional em engenharia e eficiência, e (3) compreensão regulatória e de mercado. Essa abordagem múltipla enriquece a análise qualitativa e fortalece a robustez metodológica do estudo, conforme recomendado por Yin (2016) para estudos de caso.

As entrevistas seguiram um roteiro semiestruturado comum, com seis perguntas alinhadas aos objetivos específicos da pesquisa (Capítulo 1.2.2), abrangendo: consolidação da liderança dinamarquesa, tecnologias utilizadas, políticas públicas, impactos ambientais e sociais, engajamento com stakeholders, e estratégias recomendadas para o Brasil. As respostas foram transcritas e analisadas qualitativamente conforme a metodologia descrita no Capítulo 3.

A.2. ROTEIRO SEMIESTRUTURADO COMUM

As três entrevistas seguiram o seguinte roteiro de perguntas:

Pergunta 1: Como as empresas/o setor dinamarquês se consolidaram como líder na produção de biometano, e quais fatores foram cruciais para esse sucesso?

Pergunta 2: Quais tecnologias as empresas dinamarquesas utilizam para otimizar a produção de biogás e biometano, e como elas diferem de outros países?

Pergunta 3: Como as políticas públicas dinamarquesas apoiam o setor, e quais lições o Brasil poderia aprender?

Pergunta 4: Quais são os principais impactos ambientais e sociais da produção de biometano na Dinamarca?

Pergunta 5: Como as empresas na Dinamarca engajam comunidades e stakeholders, e o que o Brasil poderia adotar desse modelo?

Pergunta 6: Quais estratégias você recomendaria para o Brasil escalar a produção de biometano?

A.3. ENTREVISTA 1 (E1)

Perfil do Entrevistado: Profissional de Marketing e Relações Públicas da Nature Energy

Experiência: Mais de 8 anos na empresa

Data: 20 de outubro de 2024

Formato: Videoconferência via Google Meet

Duração: 75 minutos

Observações: O entrevistado solicitou anonimato e não autorizou gravação. As respostas foram anotadas durante a entrevista e posteriormente transcritas.

Pergunta 1: Como a Nature Energy se consolidou como líder na produção de biometano na Dinamarca, e quais fatores foram cruciais para esse sucesso?

Resposta: "Começamos pequenos, com quatro plantas, e hoje temos 14, produzindo cerca de um terço do gás renovável da rede dinamarquesa. O que nos levou ao topo foi um conjunto de fatores: o governo oferece incentivos, como tarifas garantidas e isenções fiscais, que tornam os projetos viáveis. Também investimos pesado em tecnologias modernas, como sistemas que purificam o biogás até virar biometano de alta qualidade. Além disso, trabalhamos de mãos dadas com agricultores, que fornecem resíduos e recebem fertilizantes naturais em troca. Isso cria uma relação ganha-ganha e mantém nossos custos baixos."

Pergunta 2: Quais tecnologias a Nature Energy utiliza para otimizar a produção de biogás e biometano, e como elas diferem de outros países?

Resposta: "Nossas plantas usam um processo chamado digestão anaeróbia termofílica, que funciona em temperaturas mais altas e produz mais metano, cerca de 20% a mais que os sistemas padrão. Misturamos diferentes resíduos, como esterco, restos de comida, e até plantas energéticas, para maximizar a produção. Para transformar o biogás em biometano, usamos filtros de membrana que removem impurezas, deixando o gás quase puro. Pelo que sei, no Brasil, a digestão anaeróbia também é comum, mas a purificação ainda está

começando. Aqui, nossas plantas são projetadas para crescer rápido e se conectar direto à rede de gás, o que facilita tudo."

Pergunta 3: Como as políticas públicas dinamarquesas apoiam o setor, e quais lições o Brasil poderia aprender?

Resposta: "Na Dinamarca, temos regras claras desde 2016 que incentivam o biometano, como descontos em impostos e apoio financeiro para novas plantas. Nossa meta é zerar o uso de combustíveis fósseis até 2050, então o governo investe nisso. No Brasil, ouvi falar do RenovaBio, que é um bom começo, mas acho que falta detalhar como o biometano pode entrar na rede de gás ou ser usado em caminhões. Vocês poderiam criar incentivos diretos, como os nossos, e normas técnicas para dar segurança aos investidores."

Pergunta 4: Quais são os principais impactos ambientais e sociais da produção de biometano pela Nature Energy?

Resposta: "Estamos cortando cerca de meio milhão de toneladas de CO₂ por ano, substituindo diesel e gás natural em ônibus e sistemas de aquecimento. O resíduo do processo, chamado digestato, vira fertilizante natural, ajudando os agricultores e reduzindo a poluição. Mas temos desafios, como evitar vazamentos de metano, que controlamos com monitoramento constante. Socialmente, criamos empregos e apoiamos agricultores com renda extra. No Brasil, vi projetos parecidos, mas vocês precisam gerenciar melhor os resíduos para não poluir rios ou solos. Ser transparente sobre os impactos ambientais ajuda a ganhar confiança da sociedade em geral."

Pergunta 5: Como a Nature Energy engaja comunidades e stakeholders, e o que o Brasil poderia adotar desse modelo?

Resposta: "Aqui, as pessoas veem o biometano como parte de um estilo de vida sustentável. Fazemos campanhas para mostrar como ele reduz poluição e cria empregos, e trabalhamos com agricultores que ganham ao economizarem com a compra de fertilizantes e os custos com tratamento de resíduos. Isso cria uma conexão forte com a comunidade. No Brasil, parece que muita gente ainda não entende o que é biogás. Vocês poderiam fazer campanhas locais, demonstrando a renda extra que os agricultores podem ganhar e como isso protege o meio ambiente. Criar cooperativas rurais, como fazemos, também ajudaria a envolver as pessoas."

Pergunta 6: Quais estratégias a Nature Energy recomenda para o Brasil escalar a produção de biometano?

Resposta: "O Brasil tem um potencial enorme, com toneladas de resíduos agrícolas. Eu sugeriria começar com plantas menores, adaptadas para biomassas como vinhaça de cana, e ir crescendo aos poucos. Aqui, nossas tecnologias são modulares, então podemos expandir sem gastar muito. Vocês precisam de regras claras para atrair empresas e programas para treinar técnicos, porque importar tudo é caro. Parcerias com empresas grandes, como a nossa e com a Shell, que é nossa atual acionista, podem trazer o dinheiro e o conhecimento que o Brasil precisa para decolar."

A.4. ENTREVISTA 2 (E2)

Perfil do Entrevistado: Profissional com expertise técnico-operacional em engenharia e eficiência de plantas de biogás

Data: 19 de janeiro de 2026

Formato: E-mail (mediante contato estabelecido via LinkedIn)

Observações: Entrevista conduzida por escrito, permitindo respostas técnicas detalhadas.

Pergunta 1: Como as empresas/o setor dinamarquês se consolidaram como líder na produção de biometano, e quais fatores foram cruciais para esse sucesso?

Resposta: "A chave não foi apenas a tecnologia, mas a decisão de industrializar a escala. Enquanto outros países focaram em plantas pequenas dentro das fazendas, a Nature Energy apostou em plantas centralizadas de grande porte. Isso nos permitiu ter uma equipe de engenharia dedicada 24/7 em cada planta, garantindo uma eficiência operacional que um agricultor sozinho nunca conseguiria. A liderança veio da profissionalização da operação."

Pergunta 2: Quais tecnologias as empresas dinamarquesas utilizam para otimizar a produção de biogás e biometano, e como elas diferem de outros países?

Resposta: "O diferencial está no pré-tratamento da biomassa e na flexibilidade. Utilizamos sistemas capazes de processar resíduos com alto teor de sólidos e difícil degradação (como palha e cama de frango), algo que tecnologias convencionais de outros países lutam para fazer. Além disso, nossa purificação foca especificamente na especificação da rede de gás natural. Não geramos apenas eletricidade; entregamos uma molécula (CH₄) pronta para a

rede de alta pressão, o que exige um controle de qualidade muito mais rigoroso do que a queima em motores de cogeração comuns."

Pergunta 3: Como as políticas públicas dinamarquesas apoiam o setor, e quais lições o Brasil poderia aprender?

Resposta: "O apoio crucial foi a garantia de conexão à rede. O governo dinamarquês obrigou as distribuidoras a aceitarem o biogás, desde que estivesse na especificação correta. Para o Brasil, a lição é técnica: não adianta produzir se não houver escoamento garantido. Políticas que financiem a infraestrutura de interconexão (gasodutos virtuais ou físicos) são tão importantes quanto o subsídio na produção."

Pergunta 4: Quais são os principais impactos ambientais e sociais da produção de biometano na Dinamarca?

Resposta: "Do ponto de vista técnico, o maior impacto é o gerenciamento de nutrientes. Nós devolvemos ao solo um biofertilizante com nitrogênio e fósforo muito mais facilmente absorvível pelas plantas do que o esterco cru. Isso reduz a necessidade de fertilizantes químicos sintéticos, que têm uma pegada de carbono enorme. Socialmente, resolvemos um problema sanitário para o agricultor, que não precisa mais lidar com lagoas de dejetos a céu aberto."

Pergunta 5: Como as empresas na Dinamarca engajam comunidades e stakeholders, e o que o Brasil poderia adotar desse modelo?

Resposta: "Nós vendemos a solução para o problema do odor. Uma planta de biogás bem operada cheira muito menos do que o espalhamento de esterco cru nos campos. Engajamos as comunidades mostrando dados técnicos de redução de odores e de tráfego, já que otimizamos a logística de caminhões. Para o Brasil, a adoção desse modelo depende de profissionalizar a logística: caminhões selados, rotas otimizadas e menos incômodo para a vizinhança."

Pergunta 6: Quais estratégias você recomendaria para o Brasil escalar a produção de biometano?

Resposta: "Foque em hubs regionais (clusters). O Brasil é muito grande para uma rede de gás nacional integrada como a Dinamarca. A estratégia deve ser identificar regiões com alta densidade de resíduos (como o interior de São Paulo ou o oeste do Paraná) e criar redes locais isoladas ou gasodutos dedicados. Não tentem copiar o modelo nacional dinamarquês de uma vez; construam 'ilhas de biometano' onde a biomassa já está concentrada para reduzir o custo de transporte."

A.5. ENTREVISTA 3 (E3)

Perfil do Entrevistado: Profissional com expertise estratégico-regulatório, com foco em mercado, finanças e políticas públicas no setor de biometano

Data: 19 de janeiro de 2026

Formato: E-mail (mediante contato estabelecido via LinkedIn)

Observações: Entrevista conduzida por escrito, permitindo respostas estratégicas detalhadas.

Pergunta 1: Como as empresas/o setor dinamarquês se consolidaram como líder na produção de biometano, e quais fatores foram cruciais para esse sucesso?

Resposta: "O sucesso veio da verticalização da cadeia. A Nature Energy não é apenas uma operadora de plantas; nós controlamos desde a logística de coleta até a venda do certificado de gás verde. Essa visão de cadeia completa nos permitiu mitigar riscos que derrubaram outros players. Crucial também foi a parceria com o setor financeiro: conseguimos tornar projetos de biogás 'bancáveis', provando aos investidores que o fluxo de resíduos e a receita do gás eram previsíveis a longo prazo."

Pergunta 2: Quais tecnologias as empresas dinamarquesas utilizam para otimizar a produção de biogás e biometano, e como elas diferem de outros países?

Resposta: "Nossa tecnologia de otimização não é apenas o hardware, mas o software de gestão de dados. Monitoramos em tempo real o rendimento de gás de cada tonelada de resíduo que entra. Isso nos permite cobrar ou pagar fornecedores baseados na qualidade energética do resíduo. Diferente de outros países que operam 'no escuro', nós tratamos dados como ativo. Isso maximiza a margem de lucro em um mercado de margens apertadas."

Pergunta 3: Como as políticas públicas dinamarquesas apoiam o setor, e quais lições o Brasil poderia aprender?

Resposta: "O sistema de Certificados de Gás Verde (GoO) foi o divisor de águas. Ele permitiu que o valor ambiental do biometano fosse negociado separadamente da molécula física de gás. O Brasil precisa aprender que o subsídio não precisa vir só do governo; ele pode vir do mercado, se houver um sistema robusto de rastreabilidade onde empresas paguem um prêmio para abater suas metas de carbono usando biometano certificado."

Pergunta 4: Quais são os principais impactos ambientais e sociais da produção de biometano na Dinamarca?

Resposta: "O impacto principal é a segurança energética e a economia circular. Estamos descarbonizando a indústria pesada que não pode ser eletrificada facilmente. Socialmente, criamos uma nova economia no campo: o agricultor deixa de ser apenas produtor de alimentos e passa a ser fornecedor de energia. Isso traz estabilidade de renda para o campo, blindando o produtor rural contra flutuações nos preços das commodities agrícolas."

Pergunta 5: Como as empresas na Dinamarca engajam comunidades e stakeholders, e o que o Brasil poderia adotar desse modelo?

Resposta: "Engajamos os stakeholders através da propriedade compartilhada. Em muitos projetos, permitimos que associações de agricultores ou municípios tenham participação nos lucros ou na governança. O Brasil poderia adotar esse modelo de cooperativismo energético. Quando a comunidade local é 'sócia' do projeto, a resistência política desaparece e a aprovação de licenças ambientais é muito mais rápida."

Pergunta 6: Quais estratégias você recomendaria para o Brasil escalar a produção de biometano?

Resposta: "Segurança jurídica para contratos de longo prazo. O Brasil tem biomassa de sobra, muito mais que a Dinamarca. O que falta é a garantia de que a regra do jogo não vai mudar em 5 anos. Recomendamos contratos de compra de energia (PPA) de 15 a 20 anos para o biometano, atrelados a índices de inflação. Sem isso, o custo de capital no Brasil inviabiliza a infraestrutura de alta tecnologia necessária para o biometano de qualidade."

A.6. OBSERVAÇÕES FINAIS

As três entrevistas confirmaram a relevância do modelo dinamarquês como referência para o Brasil, revelando perspectivas complementares que enriquecem a compreensão do fenômeno investigado:

E1: trouxe uma visão estratégica e de comunicação, destacando a importância do engajamento comunitário e parcerias com agricultores.

E2: aprofundou aspectos técnico-operacionais, enfatizando a profissionalização da operação, o pré-tratamento de biomassa e a necessidade de infraestrutura de escoamento.

E3: forneceu insights regulatórios e financeiros, ressaltando a verticalização da cadeia, os Certificados de Gás Verde (GoO) e a segurança jurídica como fatores críticos.

A triangulação dessas perspectivas reforça os achados da análise PESTEL (Capítulo 6), especialmente nas dimensões política, econômica, tecnológica, social e ambiental. As lições práticas extraídas incluem: (1) profissionalização das operações, (2) garantia de infraestrutura de escoamento, (3) criação de mecanismos de mercado para valoração ambiental, (4) adoção de modelos cooperativos, e (5) segurança jurídica para contratos de longo prazo. Essas estratégias são adaptáveis ao contexto brasileiro por meio de abordagens regionais (hubs/clusters), parcerias intersetoriais e fortalecimento do marco regulatório.